

Ekbert Hering | Gert Schönfelder (Hrsg.)

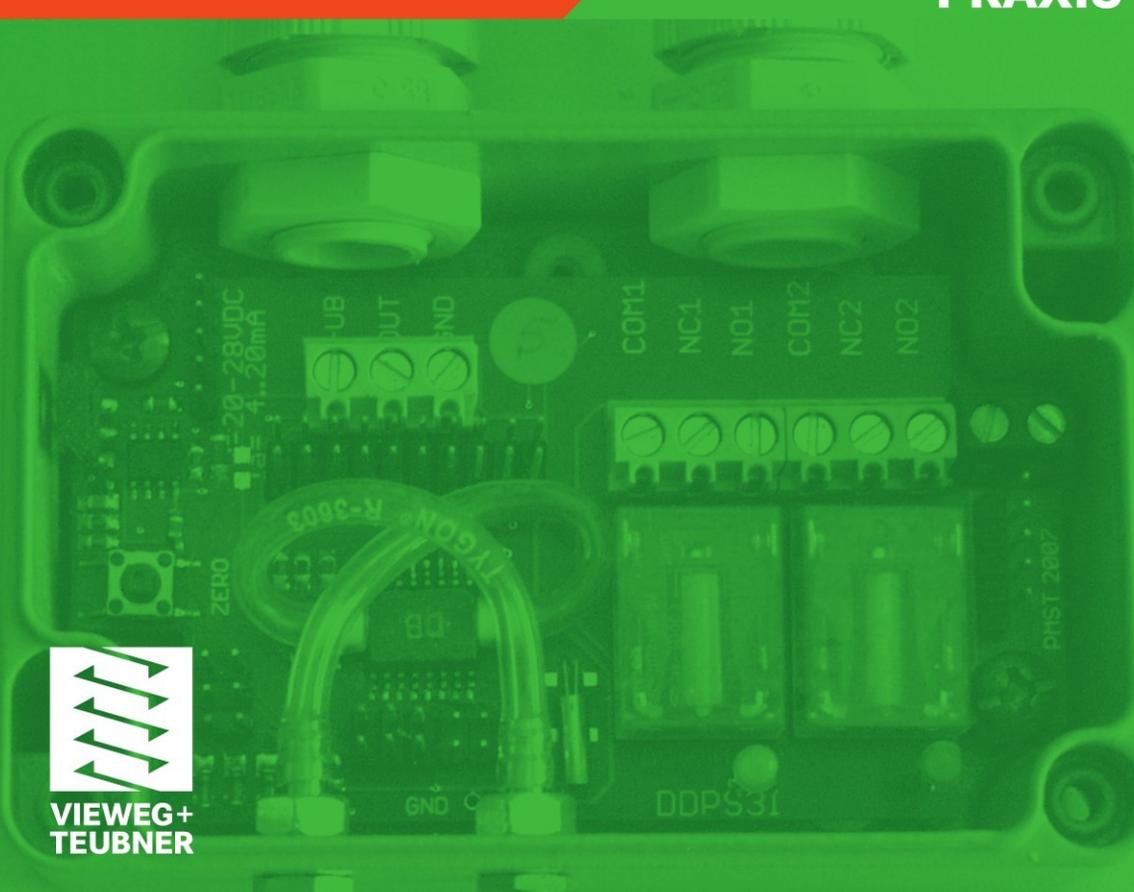
Sensoren in Wissenschaft und Technik

Funktionsweise und Einsatzgebiete

PRAXIS



**VIEWEG+
TEUBNER**



Ekbert Hering | Gert Schönfelder (Hrsg.)

Sensoren in Wissenschaft und Technik

Ekbert Hering | Gert Schönfelder (Hrsg.)

Sensoren in Wissenschaft und Technik

Funktionsweise und Einsatzgebiete

PRAXIS



VIEWEG+
TEUBNER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Das in diesem Werk enthaltene Programm-Material ist mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Der Autor übernimmt infolgedessen keine Verantwortung und wird keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Höchste inhaltliche und technische Qualität unserer Produkte ist unser Ziel. Bei der Produktion und Auslieferung unserer Bücher wollen wir die Umwelt schonen: Dieses Buch ist auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt. Die Einschweißfolie besteht aus Polyäthylen und damit aus organischen Grundstoffen, die weder bei der Herstellung noch bei der Verbrennung Schadstoffe freisetzen.

1. Auflage 2012

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012

Lektorat: Reinhard Dapper | Andrea Broßler

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Umschlagbild: Mit freundlicher Genehmigung des Herausgebers (Werkfoto Prignitz-Mst.de)

Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0169-2

Vorwort

Im Zeitalter des Internets, in dem alle Informationen in mehr oder weniger guter Qualität im Netz zugänglich sind und die Unternehmen viele Informationen in Bild und Text zur Verfügung stellen, ein umfassendes Werk über Sensorik zu verfassen, ist eine besondere Herausforderung. Wir haben ein Buch geschrieben von Praktikern für Praktiker und von Wissenschaftlern für die Studierenden und angehenden Wissenschaftler der technischen, biologischen und medizinischen Fakultäten. Unser Ziel war es, das Gebiet der Sensorik umfassend darzustellen und auch deren Randgebiete wie Schnittstellen und Sicherheitsaspekte mit abzuhandeln. Die Fülle an Informationen haben wir strukturiert gegliedert sowie übersichtlich, kompakt und anschaulich aufbereitet. Zusammen mit einem Netzwerk aus Hochschulen und Industrie haben wir die Kompetenzen zusammengebracht, die dieses Werk in der Breite und in der Tiefe einzigartig dastehen lassen. Auf diese Weise ist es für Studierende wie für den Praktiker gleichermaßen ein wertvolles Lehrbuch, ein umfassendes Nachschlagewerk und eine wichtige Orientierungshilfe in der Vielfalt der Anwendungs- und Einsatzmöglichkeiten der Sensoren.

Das vorliegende Werk gibt einen umfassenden Überblick über die Sensoren physikalischer, chemischer, klimatischer, meteorologischer sowie biologischer und medizinischer Größen. Nach einer Einführung in Kapitel 1 werden im zweiten Kapitel die physikalischen Effekte besprochen, die zur Sensornutzung herangezogen werden. In den folgenden 11 Kapiteln werden die Einsatzbereiche der Sensoren vorgestellt: Die Erfassung geometrischer Größen wie Weg und Winkel (Kapitel 3), mechanische Messgrößen (Kapitel 4), zeitbasierte Größen (Kapitel 5), thermische Sensoren (Kapitel 6), Sensoren für elektrische und magnetische Messgrößen (Kapitel 7), optische und akustische Messgrößen (Kapitel 8 und Kapitel 9), Sensoren für klimatische und meteorologische Zwecke (Kapitel 10), Sensoren in der Chemie (Kapitel 11) sowie in der Biologie und Medizin (Kapitel 12), Messung von ionisierender Strahlung (Kapitel 13) sowie fotoelektrische Sensoren in Kapitel 14. Die elektrischen Ausgangssignale müssen verarbeitet werden und die Sensoren müssen kalibriert werden, um die Sensorsignale wahrheitsgetreu zu messen (Kapitel 15). Die Interfaces zur Weiterleitung und Weiterverarbeitung sowie die Vernetzung verschiedener Sensoren spielen eine ganz wichtige Rolle (Kapitel 16). Sicherheitsaspekte bei Sensoren werden in Kapitel 17 und Messfehler und Messgenauigkeiten werden in Kapitel 18 abgehandelt. Nach jedem Kapitel sind Hinweise auf weiterführende Literatur oder Internetadressen angegeben. Damit wird es dem Leser ermöglicht, weitere detailliertere Informationen zu erhalten.

Dieses umfassende Werk zu erarbeiten war uns eine große Freude und Herausforderung zugleich. Unser Dank gilt an dieser Stelle Herrn *Ewald Schmitt* und Herrn *Reinhard Dapper* vom Vieweg+Teubner Verlag. Sie haben uns in jeder Hinsicht unterstützt und uns in vielen Entscheidungen freie Hand gelassen. Ein solches umfangreiches Werk ansprechend zu gestalten sowie den Inhalt gut zu präsentieren, dies hat in dankenswerter Weise das Unternehmen *Fromm MediaDesign* ausgezeichnet umgesetzt. Für die professionelle und freundliche Unterstützung danken wir Frau *Angela Fromm*.

Bei der Erstellung des Werkes haben über 20 Unternehmen und noch viel mehr Fachexperten aus der Industrie und den Hochschulen mitgewirkt. Deren Kompetenz ist es zu verdanken, dass wir dem Leser ein übersichtliches, kompaktes und klar strukturiertes Werk vorstellen können. Von Industrieseite ist dabei besonders Herr Dipl.-Ing. *Albert Feinäugle* vom Unternehmen *Balluff GmbH* zu nennen. Er hat es meisterhaft verstanden, die vielen Experten seines Unter-

nehmens für einen Beitrag in diesem Werk zu begeistern. Sein besonderes Engagement möchten wir hier ausdrücklich lobend und dankend erwähnen. Den vielen anderen Mitautoren aus Industrie und der Wissenschaft möchten wir ebenfalls herzlich danken.

Einen ganz besonderen Dank möchten wir unseren Ehefrauen und Kindern abstaten, die auf viele schöne und gemeinsame Tage verzichten mussten. Zu vielen Zeiten hat uns das Werk völlig in Beschlag genommen und wir mussten mit all unserer Kraft die Qualität dieses Werkes sicherstellen. Ohne die Geduld unserer Familien, ihre moralische Unterstützung und ihr großes Verständnis wäre dieses Werk nicht entstanden.

Wir hoffen, dass dieses Buch für die Studierenden, die wissenschaftlich Arbeitenden und für die Praktiker in der Industrie eine wertvolle Informations- und Orientierungsquelle darstellt. Gerne nehmen wir Kritik und Verbesserungsvorschläge entgegen.

Heubach und Dresden
im Oktober 2011

Ekbert Hering
Gert Schönfelder

Herausgeber und Autoren

Prof. Dr. rer. pol. Dr. rer. nat. Ekbert Hering	Hochschule Aalen (Rektor i. R.) www.htw-aalen.de
Dr. Gert Schönfelder	Prignitz Mikrosystemtechnik, Wittenberge www.prignitz-mst.de
Prof. Dr. Hartmut Bärwolf	Hochschule Köln www.gm.fh-koeln.de
Stefan Basler	SICK STEGMANN GmbH, Donaueschingen www.sick.de
Dr. Karl-Ernst Biehler	PIL Sensoren GmbH www.pil.de
Thomas Burkhardt	Balluff GmbH, Neuhausen a.d.F. www.balluff.com
Dr. Thomas Engel	Carl Zeiss IMT GmbH, Oberkochen www.zeiss.de
Albert Feinäugle	Balluff GmbH, Neuhausen a.d.F. www.balluff.com
Dr. Sorin Fericean	Balluff GmbH, Neuhausen a.d.F. www.balluff.com
Dr. Alexander Forkl	Balluff GmbH, Neuhausen a.d.F. www.balluff.com
Dr. Carsten Giebeler	Pyreos Ltd, Edinburgh (UK) www.pyreos.com
Prof. Dr. Ulrich Guth	Kurt-Schwabe-Institut für Messtechnik, Meinsberg www.ksi-meinsberg.de
Bernhard Hahn	Balluff GmbH, Neuhausen a.d.F. www.balluff.com
Ernst Halder	Novotechnik www.novotechnik.de
Christopher Herfort	Balluff GmbH, Neuhausen a.d.F. www.balluff.com
Robert Krah	Krah&Grote Messtechnik, Otterfing www.krah-grote.com
Prof. Dr. Martin Liess	Hochschule RheinMain, Rüsselsheim www.hs-rm.de
Prof. Dr. Lothar Michalowski	Universität Göttingen www.uni-goettingen.de

Sebastian Pastor	SICK AG, Freiburg www.sick.de
Jürgen Reichenbach	SICK AG, Freiburg www.sick.de
Dr. Martin Röbel	Disynet GmbH, Brüggen-Bracht www.sensoren.de
Stefan Sester	Novotechnik Messaufnehmer OHG, Ostfildern www.novotechnik.de
Dr. Elfriede Simon	Siemens AG, München www.siemens.com
Gerd Stephan	Quantum Hydrometrie Gesellschaft für Mess- und Systemtechnik, Berlin www.quantum-hydrometrie.de
Dr. Stefan Vinzelberg	Atomic Force F&E GmbH, Mannheim www.atomicforce.de
Prof. Dr. Winfried Vonau	Kurt-Schwabe-Institut für Messtechnik, Meinsberg www.ksi-meinsberg.de
Dr. Roland Wernecke	Dr. Wernecke Feuchtemesstechnik GmbH, Potsdam www.dr-wernecke.de
Dr. Andreas Wilde	Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen Dresden www.eas.iis.fraunhofer.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Herausgeber und Autoren	VII
1 Sensorsysteme	1
1.1 Definition und Wirkungsweise	1
1.2 Einteilung	2
2 Physikalische Effekte zur Sensornutzung	3
2.1 Piezoelektrischer Effekt	3
2.1.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	3
2.1.2 Materialien	5
2.1.3 Anwendungen	6
2.2 Resistiver und piezoresistiver Effekt	6
2.2.1 Funktionsprinzipien und physikalische Beschreibung	6
2.2.2 Resistiver Effekt und dessen Anwendung durch Dehnmess-Streifen (DMS)	8
2.2.3 Piezoresistiver Effekt und dessen Anwendung durch Silicium-Halbleiter-Elemente	10
2.3 Magneto-resistiver Effekt	12
2.3.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	12
2.3.2 Vorteile der XMR-Technologie	17
2.3.3 Anwendungen der XMR-Technologie	18
2.4 Magnetostriktiver Effekt	21
2.4.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	21
2.4.2 Vorteile der magnetostriktiven Sensor-Technologie	22
2.4.3 Anwendungen der magnetostriktiven Sensor-Technologie	23
2.5 Effekte der Induktion	25
2.5.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	25
2.5.2 Vorteile der induktiven Sensor-Technologie	30
2.5.3 Anwendungen der induktiven Sensor-Technologie	30
2.6 Effekte der Kapazität	32
2.6.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	32
2.6.1.1 Kondensator und Kapazität	32
2.6.1.2 Kapazität im Wechselstromkreis	36
2.6.2 Vorteile der kapazitiven Sensor-Technologie	41
2.5.3 Anwendungen der kapazitiven Sensor-Technologie	42
2.7 Gauß-Effekt	43
2.7.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	43
2.7.2 Anwendung des Gauß-Effektes	45
2.8 Hall-Effekt	47
2.8.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	47
2.8.2 Anwendung des Hall-Effektes	49
2.9 Wirbelstrom-Effekt	52
2.9.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	52
2.9.2 Anwendung des Wirbelstrom-Effektes	53
2.10 Thermoelektrischer Effekt	56

2.11	Thermowiderstands-Effekt	60
2.11.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	60
2.11.2	Vorteile der Sensorik mit dem Thermowiderstands-Effekt	62
2.11.3	Einsatzgebiete	63
2.12	Temperatureffekte bei Halbleitern	64
2.12.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	64
2.12.2	Kaltleiter (PTC-Widerstände)	65
2.12.3	Heißleiter (NTC-Widerstände)	67
2.13	Pyroelektrischer Effekt	69
2.13.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	69
2.13.2	Materialien	71
2.13.3	Anwendungen	72
2.14	Fotoelektrischer Effekt	75
2.14.1	Funktionsprinzipien und physikalische Beschreibung	75
2.14.2	Fotoelektrische Sensorelemente	79
2.14.3	Fotoelektrische Sensorelemente	80
2.15	Elektrooptischer Effekt	87
2.15.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	87
2.15.2	Materialien	88
2.15.3	Anwendungen	90
2.16	Elektrochemische Effekte	92
2.16.1	Funktionsprinzip und Klassifizierung	92
2.16.2	Potenziometrische Sensoren	92
2.16.3	Amperometrische Sensoren	96
2.16.4	Konduktometrische und impedimetrische Sensoren	97
2.16.5	Anwendungsbereiche	97
2.17	Chemische Effekte	99
2.17.1	Physikalisch-chemische Wechselwirkungen von Gasen mit Oberflächen	99
2.17.2	Gaslöslichkeit (Absorption)	100
2.17.3	Gastransport zur Festkörperoberfläche	102
2.17.4	Adsorption und Chemisorption	103
2.17.5	Reaktionen mit adsorbierten Spezies	104
2.17.6	Reaktion des Gases mit dem Festkörper	104
2.17.7	Die Mischphasenfehlordnung	106
2.18	Akustische Effekte	108
2.18.1	Definition und Einteilung des Schalls	108
2.18.2	Charakterisierung akustischer Wellen	108
2.18.3	Schallgeschwindigkeit in idealen Gasen	109
2.18.4	Intensität oder Schallstärke	110
2.18.5	Absorption von Schall in Luft	110
2.18.6	Reflektion und Transmission	111
2.19	Optische Effekte	112
2.19.1	Physikalische Effekte	112
2.19.2	Aufbau optischer Sensoren	116
2.19.3	Kategorien optischer Sensoren	118
2.19.4	Anwendungsfelder optischer Sensoren	119
2.20	Doppler-Effekt	120
2.20.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	120
2.20.2	Anwendungsbereiche	122
	Weiterführende Literatur	125

3	Geometrische Größen	127
3.1	Weg- und Abstandssensoren	127
3.1.1	Induktive Abstands- und Wegsensoren	128
3.1.1.1	Funktionsprinzip und morphologische Beschreibung der Induktivsensoren	128
3.1.1.2	Berührungslose induktive Abstandssensoren (INS)	130
3.1.1.3	Berührungslose induktive Wegsensoren (IWS)	137
3.1.1.4	Differenzialtransformatoren mit verschiebbarem Kern (LVDT)	140
3.1.1.5	Gepulster induktiver Linear-Positionssensor (Micropulse®BIW)	145
3.1.1.6	Signalverarbeitung durch Phasenmessung (Sagentia)	148
3.1.1.7	PLCD-Wegsensoren (Permanent Linear Contactless Displacement Sensor)	152
3.1.1.8	Berührungslose magnetoinduktive Wegsensoren (smartsens-BIL)	156
3.1.2	Optoelektronische Abstands- und Wegsensoren	162
3.1.2.1	Übersicht	162
3.1.2.2	Optoelektronische Bauteile	163
3.1.2.3	Optische Grundlagen von Abstandssensoren	167
3.1.2.4	Messprinzip: Triangulation	170
3.1.2.5	Messprinzip: Pulslaufzeitverfahren	171
3.1.2.6	Messprinzip: Phasen- oder Frequenzlaufzeitverfahren	171
3.1.2.7	Messprinzip: Fotoelektrische Abtastung	174
3.1.2.8	Messprinzip: Interferometrische Längenmessung	176
3.1.3	Ultraschallsensoren zur Abstandsmessung und Objekterkennung	177
3.1.3.1	Funktionsprinzipien und Aufbau	177
3.1.3.2	Aufbau des Ultraschallwandlers	178
3.1.3.3	Erfassungsbereich eines Ultraschallsensors	179
3.1.3.4	Umlenkung des Ultraschalls	181
3.1.3.5	Objekt- und Umwelteinflüsse	181
3.1.3.6	Anwendungen	182
3.1.4	Potenzimetrische Weg- und Winkelsensoren	184
3.1.4.1	Einleitung	184
3.1.4.2	Funktionsprinzip und Kenngrößen von potenziometrischen Sensoren	185
3.1.4.3	Technologie und Aufbautechnik	188
3.1.4.4	Produkte und Applikationen	193
3.1.5	Magnetostriktive Wegsensoren	194
3.1.5.1	Wirkprinzip und Aufbau magnetostriktiver Wegsensoren	195
3.1.5.2	Gehäusekonzepte und Anwendungen	198
3.1.6	Wegsensoren mit magnetisch codierter Maßverkörperung	204
3.1.6.1	Messprinzip	204
3.1.6.2	Aufbau und Funktionsweise inkrementeller und absoluter Mess-Systeme	206
3.1.6.3	Kennwerte	209
3.1.6.4	Sensortypen im Vergleich	212
3.1.6.5	Anwendungsbeispiele	213
3.2	Sensoren für Winkel und Drehbewegung	214

3.2.1	Optische Drehgeber	223
3.2.1.1	Physikalische Prinzipien	223
3.2.1.2	Aufbau optischer Drehgeber	225
3.2.1.3	Besondere Eigenschaften optischer Drehgeber	228
3.2.2	Magnetisch codierter Drehgeber	229
3.2.3	Umdrehungszählende Winkelsensoren	235
3.2.3.1	Allgemeines Funktionsprinzip und morphologische Beschreibung von Umdrehungen zählenden Winkelsensoren ...	235
3.2.3.2	Getriebebasierende Umdrehungszählverfahren	236
3.2.3.3	Umdrehungszählverfahren auf induktiver Basis	237
3.2.3.4	Batteriepufferung der Umdrehungsinformation	239
3.2.3.5	Neuartiges GMR-System zur Detektion und Speicherung von Umdrehungsinformation	239
3.2.4	Kapazitive Drehgeber	244
3.2.5	Variable Transformatoren, Resolver	247
3.2.5.1	Allgemeines Funktionsprinzip des VT	248
3.2.5.2	Signifikante Varianten von VT	249
3.2.5.3	Resolver, eine repräsentative Variante von VT	249
3.2.6	1Vpp oder sin/cos-Schnittstelle	254
3.2.7	Inkrementelle Geber	256
3.3	Neigung	258
3.3.1	Magnetoresistive Neigungssensoren	259
3.3.2	Kompass-Sensoren	260
3.3.3	Elektrolytische Sensoren	261
3.3.4	Piezoresistive Neigungssensoren/DMS-Biegebalkensensoren	262
3.3.5	MEMS	262
3.3.6	Servoinclinometer	263
3.3.7	Übersicht und Auswahl von Neigungssensoren	264
3.4	Sensoren zur Objekterfassung	265
3.4.1	Näherungsschalter	265
3.4.2	Objekterkennung und Abstandsmessung mit Ultraschall	275
3.4.3	Objekterkennung mit Radar	277
3.4.4	Pyroelektrische Sensoren für die Bewegungs und Praesenzdetektion ..	278
3.4.5	Objekterkennung mit Laserscanner	281
3.4.6	Sensoren zur automatischen Identifikation (Auto-Ident)	282
3.4.6.1	Übersicht	282
3.4.6.2	Barcodescanner	282
3.4.6.3	Auto-Ident-Kameras	289
3.4.6.4	RFID-Systeme und Lesegeräte	293
3.5	Dreidimensionale Messmethoden (3D-Messung)	298
3.5.1	Tastende 3D-Messmethoden	299
3.5.2	Optisch tastende 3D-Messmethoden	301
3.5.3	Bildgebende 3D-Messmethoden	305
3.5.4	Übersicht zu 3D-Messmethoden	309
	Weiterführende Literatur	310
4	Mechanische Messgrößen	313
4.1	Masse	313
4.1.1	Definition	313
4.1.2	Anwendungen	314

4.2	Kraft	315
4.2.1	Definition	315
4.2.2	Effekte für die Anwendungen	316
4.2.3	Anwendungsbereiche	320
4.3	Dehnung	323
4.3.1	Definition	323
4.3.2	Messung der Dehnung	324
4.4	Druck	326
4.4.1	Definition	326
4.4.2	Messprinzipien	328
4.4.3	Messanordnungen	329
4.5	Drehmoment	332
4.5.1	Definition	332
4.5.2	Messprinzipien	332
4.5.3	Anwendungsbereiche	333
4.6	Härte	334
4.6.1	Definition	334
4.6.2	Makroskopische Härtebestimmung	335
4.6.3	Härtebestimmung durch Nanoindentation	335
4.6.4	Sensoren für die Nano-Härtemessung	336
4.6.5	Modell und Auswertung	337
4.6.6	Anwendungen	338
	Weiterführende Literatur	339
5	Zeitbasierte Messgrößen	340
5.1	Zeit	340
5.2	Frequenz	340
5.3	Pulsbreite	346
5.4	Phase, Laufzeit und Lichtlaufzeit	348
5.5	Visuelle Darstellung von Messgrößen	353
5.6	Drehzahl und Drehwinkel	362
5.7	Geschwindigkeit	365
5.8	Beschleunigung	368
5.9	Durchfluss (Masse und Volumen)	373
	Weiterführende Literatur	377
6	Temperaturmesstechnik	378
6.1	Temperatur als physikalische Zustandsgröße	378
6.2	Messprinzipien und Messbereiche	379
6.3	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes	381
6.3.1	Metalle	381
6.3.2	Metalle mit definierten Zusätzen (Legierungen) oder Gitterfehlern	384
6.3.3	Ionenleitwerkstoffe für hohe Temperaturen	385
6.3.4	Thermistoren	385
6.3.5	Engwiderstand-Temperatur-Sensoren (Spreading Resistor)	386
6.3.6	Dioden	388
6.4	Thermoelektrizität (Seebeck-Effekt)	389
6.5	Wärmeausdehnung	393
6.5.1	Wärmeausdehnung fester Körper	393
6.5.2	Wärmeausdehnung von Flüssigkeiten	396
6.5.3	Wärmeausdehnung von Gasen	397

6.6	Temperatur und Frequenz	397
6.7	Thermochromie	398
6.8	Seegerkegel	398
6.9	Berührungslose optische Temperaturmessung	399
6.9.1	Strahlungsthermometer (Pyrometer)	399
6.9.2	Faseroptische Anwendungen	402
6.9.2.1	Intrinsische Sensoren, DTS (Distributed Temperature Sensing)	402
6.9.2.2	Extrinsische Sensoren	403
	Weiterführende Literatur	404
7	Elektrische und magnetische Messgrößen	405
7.1	Spannung	405
7.1.1	Definition	405
7.1.2	Messanordnungen	409
7.2	Stromstärke	413
7.2.1	Definition	413
7.2.2	Messanordnungen	414
7.3	Elektrische Ladung und Kapazität	416
7.3.1	Definition	416
7.3.2	Messanordnungen	419
7.4	Elektrische Leitfähigkeit und spezifischer elektrischer Widerstand	422
7.4.1	Definition	422
7.4.2	Messanordnungen	423
7.5	Elektrische Feldstärke	426
7.5.1	Definition	426
7.5.2	Messprinzipien für die elektrische Feldstärke	426
7.6	Elektrische Energie und Leistung	428
7.6.1	Definitionen	428
7.6.2	Formen von Leistung	428
7.6.3	Messprinzipien	430
7.7	Induktivität	434
7.7.1	Definition	434
7.7.2	Messprinzipien	434
7.8	Magnetische Feldstärke	435
7.8.1	Definition	435
7.8.2	Messprinzipien magnetischer Größen	436
7.8.3	Messanordnungen	437
7.8.4	Mehrdimensionale Messungen mit dem Hall-Effekt	438
	Weiterführende Literatur	440
8	Radio- und fotometrische Größen	441
8.1	Radiometrie	441
8.1.1	Radiometrische Größen	441
8.1.2	Messung elektromagnetischer Strahlung	445
8.2	Fotometrie	445
8.2.1	Fotometrische Größen	446
8.2.2	Messung fotometrischer Größen	450
8.3	Anwendung von Helligkeitssensoren	451

8.4	Farbe	452
8.4.1	Farbempfinden	452
8.4.2	Farbmodelle	455
8.4.3	Farbsysteme	456
8.4.4	Farbfilter für Sensoren	456
8.4.5	Farbsensoren	459
	Weiterführende Literatur	460
9	Akustische Messgrößen	461
9.1	Definition wichtiger akustischer Größen	461
9.2	Menschliche Wahrnehmung	462
9.2.1	Pegel	462
9.2.2	Lautstärke	464
9.2.3	Lautheit	465
9.3	Schallwandler	465
9.4	Anwendungsfelder	468
	Weiterführende Literatur	470
10	Klimatische und meteorologische Messgrößen	471
10.1	Feuchtigkeit in Gasen	471
10.1.1	Definitionen und Gleichungen	471
10.1.2	Feuchtemessungen in Gasen	475
10.1.2.1	Psychrometer, Aufbau und Funktionsweise	475
10.1.2.2	Taupunktspiegel	478
10.1.2.3	Kapazitive Feuchtemessung	480
10.1.2.4	Integrierte kapazitive Feuchtesensoren mit Bus-Ausgang	481
10.2	Feuchtebestimmung in festen und flüssigen Stoffen	482
10.2.1	Direkte Verfahren zur Bestimmung der Materialfeuchte	483
10.2.1.1	Prozentualer Wassergehalt einer Materialprobe	483
10.2.1.2	Wasseraktivität einer Materialprobe	484
10.2.1.3	Karl-Fischer-Titration	485
10.2.1.4	Calciumcarbid-Methode	485
10.2.1.5	Calciumhydrid-Methode	486
10.2.2	Indirekte Messverfahren zur Bestimmung der Materialfeuchte	486
10.2.2.1	Messung der elektrischen Eigenschaften	486
10.2.2.2	Erfassen der optischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf	487
10.2.2.3	Messung des Saugdruckes in feuchten Materialien (Tensiometrie)	488
10.2.2.4	Messung der atomaren Eigenschaften	489
10.2.2.5	Nuklear-Magnetisches-Resonanz-Verfahren (NMR)	489
10.2.2.6	Messung der Wärmeleitfähigkeit	490
10.3	Messung von Niederschlägen im Außenklima	491
10.4	Feuchtemessung in geschlossenen Räumen	493
10.4.1	Messung des Klimas in Wohnungen und am Arbeitsplatz	493
10.4.2	Klima in Museen und Ausstellungsräumen	494
10.4.3	Klima in elektrischen Anlagen	496
10.4.4	Beeinflussen des Raumklimas	496
10.5	Luftdruck	498

10.6	Wind- und Luftströmung	499
10.6.1	Definition	499
10.6.1	Methoden zur Windmessung	499
10.7	Wasserströmung	503
10.7.1	Definition	503
10.7.2	Direkte und indirekte Durchflussmessung	503
	Weiterführende Literatur	508
11	Ausgewählte chemische Messgrößen	509
11.1	Redoxpotenzial	509
11.1.1	Allgemeines	509
11.1.2	Edelmetallische Redoxelektroden	511
11.1.3	Redoxgaselektroden	513
11.1.4	Bezugselektroden	515
11.2	Ionen einschließlich Hydroniumionen	518
11.2.1	Allgemeines	518
11.2.2	pH-Messung	518
11.2.3	Weitere Ionen	523
11.3	Gase	527
11.3.1	Allgemeines	527
11.3.2	Gase im physikalisch gelösten Zustand bzw. bei Normaltemperatur ...	527
11.3.2.1	Festelektrolytsensoren	529
11.3.2.2	Elektrochemische Zellen mit festen Elektrolyten	530
11.3.3	Halbleiter-Gassensoren – Metalloxidhalbleitersensoren (MOS)	539
11.3.4	Pellistoren	540
11.4	Elektrolytische Leitfähigkeit	541
11.4.1	Allgemeines	541
11.4.2	Kohlrausch-Messzellen	541
11.4.3	Mehrelektroden-Messzellen	542
11.4.4	Elektrodenlose Leitfähigkeitsmesszellen	543
11.4.5	Beispiele zur Anwendung von Leitfähigkeitssensoren	544
	Weiterführende Literatur	546
12	Biologische und medizinische Sensoren	547
12.1	Biologische Sensorik	547
12.1.1	Biosensorik	547
12.1.2	Echte biologische Sensoren	549
12.2	Funktionsprinzipien der Biosensoren	550
12.2.1	Kalorimetrische Sensoren	552
12.2.2	Mikrogravimetrische Sensoren	552
12.2.3	Optische Sensoren	554
12.2.4	Elektrochemische Sensoren	556
12.2.5	Immobilisierungsmethoden	558
12.3	Physikalische und chemische Sensoren in der Medizin	559
12.3.1	Physikalisch-chemische Blutanalysen	560
12.3.2	Klinisch-chemische Blutanalysen	563
12.4	Enzymatische Methoden – Enzymsensoren	564
12.4.1	Enzymbasierter Analytnachweis	566
12.4.2	Bestimmung der Enzymaktivität	567
12.4.3	Anwendungsfelder enzymatischer Tests	568

12.5	Immunologische Methoden – Immunosensoren	569
12.5.1	Direkte Immunosensoren	572
12.5.2	Indirekte Immunosensoren	572
12.5.3	Anwendungsfelder von Immunosensoren	574
12.6	DNA-basierte Sensoren	575
12.6.1	Hybridisierungsdiagnostik	576
12.6.2	Anwendung und Einsatz von DNA-Sensoren	577
12.7	Zellbasierte Sensorik	579
12.7.1	Metabolischer Zellchip	579
12.7.2	Neuro-Chip	580
	Weiterführende Literatur	581
13	Messgrößen für ionisierende Strahlung	583
13.1	Einführung und physikalische Größen	583
13.2	Wechselwirkung von ionisierender Strahlung mit Materie	587
13.3	Einteilung der Sensoren	591
13.4	Gasgefüllte Strahlungssensoren	594
13.5	Strahlungssensoren nach dem Anregungsprinzip	598
13.6	Halbleitersensoren	600
	Weiterführende Literatur	608
14	Fotoelektrische Sensoren	609
14.1	Strahlung	609
14.2	Szintillatoren	610
14.3	Äußerer Fotoeffekt	611
14.3.1	Fotomultiplier	611
14.3.2	Channel-Fotomultiplier	612
14.3.3	Bilddaufnahmeröhren	613
14.4	Innerer Fotoeffekt	613
14.4.1	Fotoleiter	614
14.4.2	Fotodioden	615
14.4.3	Fototransistor, Fotothyristor und Foto-FET	617
14.4.4	CMOS-Bildsensoren	618
14.4.5	Hochdynamische CMOS-Bildsensoren	618
14.5	CCD-Sensoren	620
14.5.1	Zeilensensoren	620
14.5.2	CCD-Matrixsensoren	622
14.6	Quantum Well Infrared Photodetector QWIP	623
14.7	Thermische optische Detektoren	624
14.7.1	Thermosäulen	625
14.7.2	Pyroelektrische Detektoren	627
14.7.3	Bolometer	628
15	Signalaufbereitung und Kalibrierung	629
15.1	Signalaufbereitung	629
15.1.1	Analoge (diskrete) Signalaufbereitung	629
15.1.2	Signalaufbereitung mit Systemschaltkreisen	630
15.1.3	Signalaufbereitung mit ASICs	631
15.1.4	Signalaufbereitung mit Mikrocontrollern	631

15.2	Sensorkalibrierung	632
15.2.1	Passive Kompensation	633
15.2.2	Justage mit analoger Signalverarbeitung	633
15.2.3	Justage mit digitaler Signalverarbeitung	634
15.3	Energiemanagement bei Sensoren	636
	Weiterführende Literatur	638
16	Interface	639
16.1	Analoge Interfaces	639
16.1.1	Spannungsausgang	640
16.1.2	Ratiometrischer Spannungsausgang	640
16.1.3	Stromausgang	640
16.1.4	Frequenzausgang und Pulsweitenmodulation	642
16.1.5	4-/6-Draht-Interface	643
16.2	Digitale Interfaces	644
16.2.1	CAN-Gruppe	646
16.2.2	LON	647
16.2.3	HART	648
16.2.4	RS485	648
16.2.5	IO-Link	649
16.2.6	Profibus	651
16.2.7	I ² C	651
16.2.8	SPI	652
16.2.9	IEEE 1451	653
	Weiterführende Literatur	656
17	Sicherheitsaspekte bei Sensoren	657
17.1	Eigenschaften zur Funktionüberwachung	657
17.2	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	660
17.3	Funktionale Sicherheit (SIL)	663
17.4	Sensoren in explosiver Umgebung (ATEX)	665
17.4.1	Grundlagen des ATEX	665
17.4.2	Zündschutzart Eigensicherheit	667
17.4.3	Zündschutzart druckfeste Kapselung	669
	Weiterführende Literatur	669
18	Messfehler, Messgenauigkeit und Messparameter	670
18.1	Einteilung der Messfehler nach ihrer Ursache	670
18.2	Darstellung von Messfehlern	671
18.2.1	Arithmetischer Mittelwert, Fehlersumme und Standardabweichung	671
18.2.2	Absoluter Fehler	672
18.2.3	Relativer Fehler	673
18.3	Messparameter	675
18.3.1	Streuung von Messwerten	675
18.3.2	Auflösung von Messwerten	676
18.3.3	Signal-Rausch-Abstand und Dynamik von Messwerten	677
	Weiterführende Literatur	677
	Sachwortverzeichnis	678

1 Sensorsysteme

Um das tägliche Leben mit seinen Aufgaben zu meistern, muss der Mensch die ihn umgebenden Prozesse beeinflussen können, d. h. er muss sie nach seinen Zielen steuern können. Um dies zu ermöglichen, muss der aktuelle Istzustand erfasst, deren Informationen ausgewertet und die Maßnahmen ergriffen werden können, die zur Zielerreichung dienen. Die Elemente, mit denen die *Erfassung der Messgrößen der Umwelt* möglich ist, sind die Sensoren. Sie bilden damit die Voraussetzung für alle Veränderungen und Entwicklungen im natürlichen oder technischen Umfeld der Menschen. Unterschiedliche Effekte in Physik, Chemie, Biologie und Medizin ermöglichen eine Vielfalt an Sensoren und Anwendungsmöglichkeiten. Diese werden in diesem Werk umfassend dargestellt, ohne jedoch dem Anspruch an Vollständigkeit zu genügen.

1.1 Definition und Wirkungsweise

Das Wort „Sensor“ stammt aus dem Lateinischen (sensus: Sinn) und bedeutet *Fühler*. Bild 1-1 zeigt die Wirkungsweise von Sensoren.

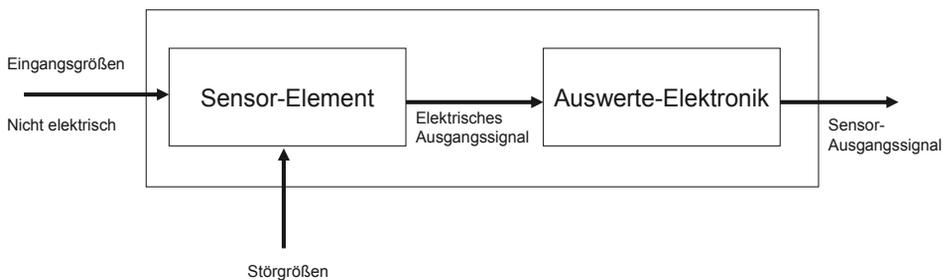


Bild 1.1-1 Wirkprinzip von Sensoren

Ein Sensor dient zur quantitativen und qualitativen Messung von physikalischen, chemischen, klimatischen, biologischen und medizinischen Größen. Wie Bild 1-1 zeigt, besteht der Sensor aus zwei Teilen: dem *Sensor-Element* und der *Auswerte-Elektronik*. Die zu messenden, *nicht elektrische Eingangsrößen* werden im Sensor-Element durch naturwissenschaftliche Gesetze in ein *elektrisches Ausgangs-Signal* gewandelt. In einer *Auswerte-Elektronik* werden diese Ausgangssignale durch Schaltungselektronik oder auch Softwareprogramme so bearbeitet, dass ein *Sensor-Ausgangssignal* entsteht, das zu Steuerungs- oder Auswertezwecken zur Verfügung steht. Dabei können die äußeren Störgrößen, die ein Sensor-Element beeinflussen, rechnerisch berücksichtigt werden (z. B. Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit oder Linearisierung von nicht linearen Zusammenhängen). Dies besorgt in der Regel ein Mikroprozessor. Die fortschreitende Miniaturisierung erlaubt es zunehmend, dass beide Teile, das Sensor-Element und die Auswerte-Elektronik, in einem einzigen Sensor untergebracht sind. Diese *intelligenten* Sensoren werden auch als *smart sensors* bezeichnet.

1.2 Einteilung

Wird die Umwandlung der Messgröße in eine elektrische Größe ohne äußere Hilfsspannung vorgenommen, dann sind dies *aktive Sensoren* (z. B. wird beim piezoelektrischen Effekt der Druck direkt in eine elektrische Größe verwandelt, siehe Abschnitt 2.1). *Passive Sensoren* hingegen benötigen zur Umwandlung eine äußere Hilfsspannung (z. B. bei der Messung von Abständen durch Ultraschallsensoren).

Eine weitere Einteilung kann durch die *naturwissenschaftlichen Gesetze* erfolgen, welche die Eingangsgröße in ein elektrisches Ausgangssignal wandeln. Diese Gesetze sind ausführlich in Abschnitt 2 des Werkes dargestellt.

Eine Einteilung kann aber auch durch die zu *messenden Größen* selbst erfolgen (z. B. Messen geometrischer Größen wie Länge oder zeitliche Größen wie Frequenzen). Dies ist in den Abschnitten 3 bis 14 nachzulesen.

Die Digitaltechnik spielt für die weitere Verarbeitung der Sensor-Ausgangssignale eine immer wichtigere Rolle. Deshalb erwartet man häufig *digitale* Sensor-Ausgangssignale. Dies wird oft dadurch realisiert, dass Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) in die Auswerte-Elektronik des Sensorsystems integriert werden.

Werden aus den Messwerten realer Sensor-Elemente mittels Software die gewünschten Messgrößen errechnet, dann spricht man von *virtuellen* Sensoren. Diesen liegen ein umfangreiches *mathematisches Rechenmodell* oder auch *empirisch erfasste Zusammenhänge* zugrunde (z. B. das subjektive Hörempfinden). Da solche Rechner heute sehr platzsparend unterzubringen, kostengünstig herzustellen und in rauen Industrieumgebungen problemlos einsetzbar sind, werden die virtuellen Sensoren überall dort eingesetzt, wo es gilt, Kosten zu sparen, die naturwissenschaftlichen Zusammenhänge nur empirisch vorliegen oder in Anwendungsfällen, in denen reale Sensoren zerstört oder zu schnell verschleiß würden (z. B. in Kernkraftwerken).

2 Physikalische Effekte zur Sensornutzung

2.1 Piezoelektrischer Effekt

2.1.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung

Werden bestimmte Materialien durch Einwirkung von äußeren Kräften oder Drücken *verformt*, dann entsteht eine *elektrische Spannung*. Wie Bild 2.1-1 zeigt, verschieben die Kraft bzw. der Druck die Ladungen im Inneren des Materials. Die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen fallen nicht mehr zusammen. Dadurch entsteht eine *elektrische Polarisation P* . An der Oberfläche der Materialien sammeln sich Ladungen, so dass eine *elektrische Spannung* gemessen werden kann.

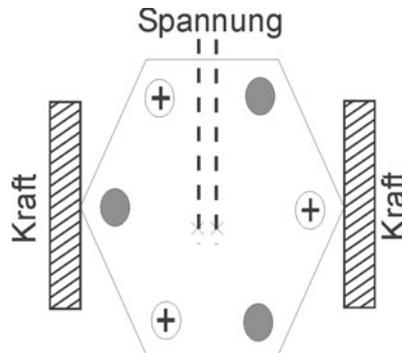


Bild 2.1-1 Prinzip des longitudinalen, piezoelektrischen Effektes

Je nachdem, welche Richtung die Vektoren Kraft F , die Polarisation P und der Oberflächen-Normalenvektor n zueinander einnehmen, gibt es drei Kategorien des piezoelektrischen Effektes (Bild 2.1-2):

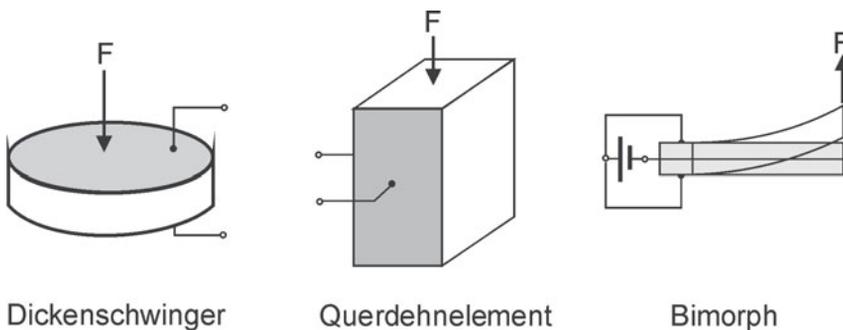


Bild 2.1-2 Die drei Prinzipien des piezoelektrischen Effektes

Im umgekehrten Fall (*inverser piezoelektrischer Effekt*) wird durch Anlegen einer elektrischen Spannung der Kristall verformt. Wenn dies Wechsellspannungen sind, dann führen piezoelektrische Körper *mechanische Schwingungen* aus. Diese können in Spannungsrichtung (longitudinale Schwingungen, *Dickenschwinger*) oder senkrecht zur Spannungsrichtung (transversale Schwingungen, *Querdehnelement*) erfolgen. Im Folgenden wird nur der *direkte piezoelektrische Effekt* behandelt.

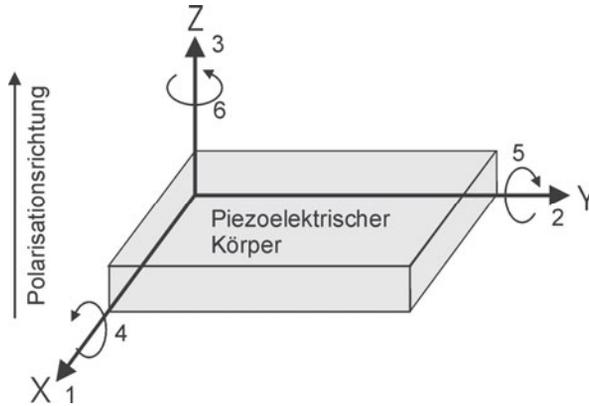


Bild 2.1-3 Koordinatensystem zur Beschreibung des piezoelektrischen Effektes

Bild 2.1-3 beschreibt den piezoelektrischen Effekt im Raum. Durch eine Kraft F entsteht eine Ladungs-Verschiebung in Längsrichtung (1: 1, 2, 3) und im Winkel um die Achsen (1: 4, 5, 6). Die Polarisationsrichtungen seien k : 1, 2, 3. Die Kraft F bewirkt dann eine Ladungsverschiebung Q , für die gilt:

$$Q = d_{kl} F,$$

wobei d_{kl} der *piezoelektrische Koeffizient* ist.

Zwischen Polarisierung P und der Spannung σ gilt:

$$P = e \sigma,$$

wobei e der *piezoelektrische Dehnungskoeffizient* ist und für σ gilt:

$$\sigma_{ij} = \frac{F_i}{A_j},$$

wobei A die Fläche und F die Kraft bezeichnet. Die Richtung der Kraft ist mit den Indizes i (1,2,3) und die Richtung der Fläche mit den Indizes j (1,2,3) bezeichnet. Der piezoelektrische Effekt ist *temperaturabhängig* und teilweise stark nichtlinear.

Eine konstante Kraft, die keine zusätzliche geometrische Änderung des Körpers verursacht, bewirkt keinen piezoelektrischen Effekt. Beim piezoelektrischen Effekt ist also nur die *zeitliche Änderung* der Kraft proportional zum gemessenen Strom. Wird über diesen Strom nach der Zeit integriert, so erhält man die verschobene Ladung ($Q = \int I(t) dt$), die nach obiger Gleichung proportional zur Kraftänderung ist. Durch eine spezielle Schaltungselektronik können aber auch quasistationäre Vorgänge von einigen Minuten gemessen werden.

2.1.2 Materialien

Nur in *nicht leitenden Materialien* tritt der piezoelektrische Effekt auf. Diese Materialien dürfen kein Symmetriezentrum besitzen, weil sonst keine Verschiebung der Ladungen möglich ist. (Bei einer Punktspiegelung wird der Kristall in sich selbst übergeführt). Bei den Materialien unterscheidet man:

- *Piezoelektrische Kristalle*

Dazu gehören der α -Quarz (SiO_2), Turmalin, Lithiumniobat (LiNbO_3), Lithium-Tantalat (LiTaO_3), Gallium-Orthophosphat (GaPO_4), Bariumtitanat (BaTiO_3 : BTO) und Blei-Zirkonat-Titanat ($\text{Pb},\text{O},\text{Ti}/\text{Zr}$: PZT). Diese Kristalle haben sehr geringe piezoelektrische Koeffizienten; dafür zeigen sie aber eine höhere Temperaturstabilität, geringere Verluste und eine kleinere Hysteresekurve.

- *Piezoelektrische Keramiken*

Die meisten piezoelektrischen Materialien werden synthetisch hergestellt. Typische Vertreter sind Blei-Zirkonat-Titanate (PZT). Sie kristallisieren, wie Bild 2.1-4 zeigt, in einer *Perowskit-Kristallstruktur* aus.

- *Sonstige piezoelektrische Materialien*

Es ist möglich, piezoelektrische Dünnschichten, wie Zinkoxid (ZnO) oder Aluminiumnitrid (AlN), durch die Halbleitertechnologie als Dünnschichten auf Silicium abzuscheiden. Ebenfalls im Einsatz befindet sich Polyvinylidenfluorid (PVDF).

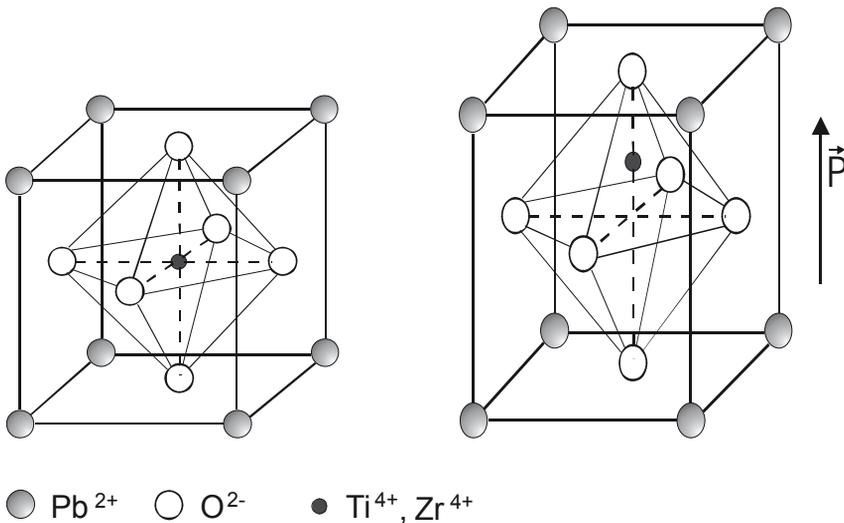


Bild 2.1-4 Perowskit-Struktur der piezoelektrischen Keramiken

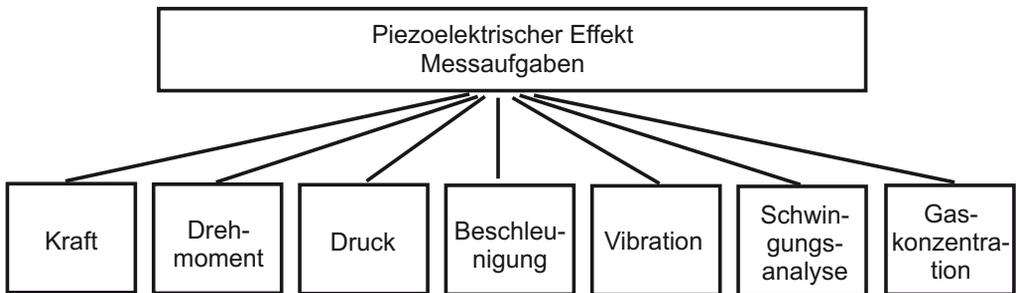
Tabelle 2.1-1 zeigt den piezoelektrischen Koeffizienten ausgewählter Materialien.

Tabelle 2.1-1 Piezoelektrischer Koeffizient ausgewählter Materialien

Material	Piezoelektrischer Koeffizient d_{ij}	Wert in pC/N
Lithium-Niobat	d_{22}	0,67
Turmalin	d_{33}	1,83
Quarz	d_{11}	2,3
Lithium-Tantalat	d_{33}	9,2
PVDF-Folie	d_{13}	23
PZT-Keramik	d_{33}	593

2.1.3 Anwendungen

In Bild 2.1-5 sind die wichtigsten Anwendungsfelder zusammengestellt. Die konkreten Anwendungen werden im Abschnitt 3 ausführlich dargestellt.

**Bild 2.1-5** Anwendungsfelder piezoelektrischer Materialien

Piezoelektrische Materialien werden darüber hinaus in vielen Spezialanwendungen eingesetzt, von denen hier nur wenige genannt werden können:

- Einspritzdüsen für Dieselmotoren,
- Druckköpfe in Tintenstrahldruckern,
- Mikro- und Nano-Positioniersysteme und
- Mikroskopie (Rasterelektronen-, Rasterkraft- und Rastertunnelmikroskope).

2.2 Resistiver und piezoresistiver Effekt

2.2.1 Funktionsprinzipien und physikalische Beschreibung

Der *resistive* Effekt beschreibt die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ eines Leiters von der mechanischen Spannung σ ($\sigma = F/A$, wobei F die Kraft ist die auf die senkrechte Fläche A wirkt). Bei Metallen ist der *spezifische elektrische Widerstand* ρ *unabhängig von der Spannung* σ , wie Bild 2.2-1 zeigt.

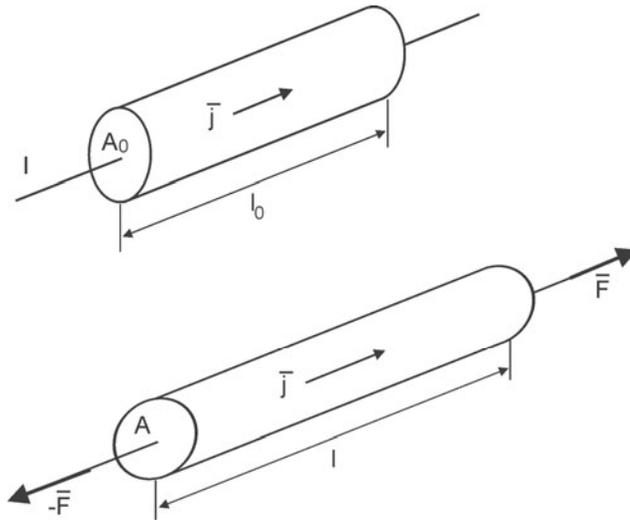


Bild 2.2-1 Leiter unter mechanischer Spannung

Der elektrische Widerstand R eines metallischen Leiters der Länge l_0 und dem Querschnitt A lautet:

$$R = \rho \frac{l_0}{A_0}.$$

Das bedeutet:

- Der Widerstand wird größer, wenn die Länge zunimmt (R proportional zu l_0).
- Der Widerstand wird kleiner, wenn der Querschnitt zunimmt (R proportional zu $1/A_0$).

Das heißt, wenn ein elektrischer Leiter gedehnt wird, d. h., wenn seine Länge zunimmt und gleichzeitig sein Querschnitt abnimmt, dann steigt der elektrische Widerstand. Wird das Material im elastischen Bereich beansprucht, dann gilt dieses auch umgekehrt: Wird ein elektrischer Leiter gestaucht (Verkürzung der Länge und Erhöhung des Querschnitts), dann nimmt der elektrische Widerstand ab. Diese Effekte werden bei *Dehnmess-Streifen* (DMS) ausgenutzt (Abschnitt 4.3).

Wirkt eine mechanische Spannung auf den metallischen Leiter, so gilt:

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} = E \varepsilon,$$

wobei E der Elastizitätsmodul und $\Delta l/l$ die relative Längenänderung (*Dehnung* ε) ist.

Wirkt eine Kraft F auf die Leiterfläche A , so gilt für den Widerstand R_F entsprechend:

$$R_F = \rho \frac{l_F}{A_F}.$$

Die Widerstandsänderung errechnet sich dann zu:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = k \varepsilon,$$

wobei bei gleichem Volumen k etwa 2 ist (der Faktor k steht für die *Empfindlichkeit*). Dieser Effekt wird *resistiver Effekt* genannt und hängt lediglich von der Änderung der geometrischen Größen Länge und Querschnitt ab. Er findet seine Anwendung in *Dehnmess-Streifen (DMS, Abschnitt 4.3)*. Bei Halbleitern hingegen, wie beispielsweise Silicium, verändert sich der spezifische elektrische Widerstand ρ bei Anlegen einer Spannung σ (*piezoresistiver Effekt* (Abschnitt 2.2.3)). Der Grund liegt darin, dass mechanische Spannungen die Beweglichkeit der Ladungsträger und die Besetzungswahrscheinlichkeiten der Leitungs- und Valenzbänder beeinflussen.

2.2.2 Resistiver Effekt und dessen Anwendung durch Dehnmess-Streifen (DMS)

Am häufigsten werden *Folien-DMS* eingesetzt. Auf einer dünnen Kunststoff-Folie (meist aus Polyimid) wird ein hauchdünner Widerstandsdraht (3 μm bis 8 μm dick) mäanderförmig als *Messgitter* aufgebracht und mit elektrischen Anschlüssen versehen (Bild 2.2-2). Meistens besitzen die DMS auch noch eine Kunststoff-Folie auf der Oberfläche, damit das Messgitter mechanisch geschützt ist. Für die unterschiedlichsten Einsatzbereiche können die verschiedensten Geometrien eingesetzt werden (Bild 2.2-2). Für jeden Einsatzbereich werden die DMS entsprechend optimiert.

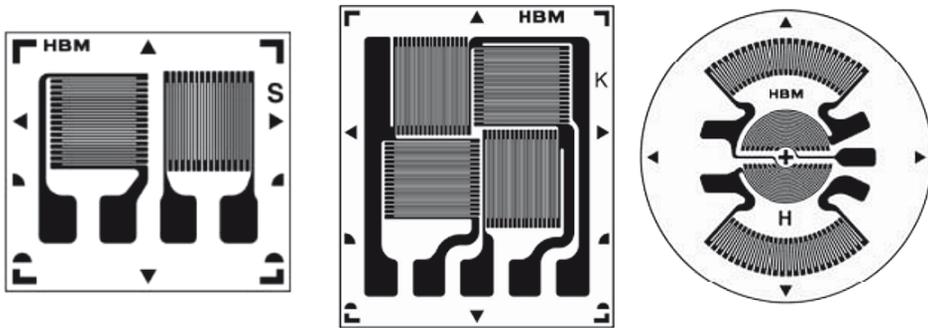


Bild 2.2-2 Folien-DMS unterschiedlichster Geometrien (Werkfoto: HBM)

Tabelle 2.2-1 zeigt die k -Faktoren verschiedener DMS-Werkstoffe.

Tabelle 2.2-1 Empfindlichkeiten (k -Faktoren) verschiedener DMS-Werkstoffe

Bezeichnung	Zusammensetzung	k -Faktor
Konstantan	54Cu, 45Ni, 1Mn	2,05
Karma	73Ni, 20Cr, Rest Fe und Al	2,1
Nichrome V	80Ni, 20Cr	2,2
Chromol C	65Ni, 20Fe, 15Cr	2,5
Platin-Wolfram	92Pt, 8W	4,0
Platin	100Pt	6,0

Die Widerstandsänderung ΔR einer handelsüblichen DMS ist relativ klein. Bei einem DMS von 120Ω und einer Dehnung um $1/1.000$ beträgt die Widerstandsänderung $\Delta R = 0,24 \Omega$. Mit entsprechenden Messvorrichtungen können diese Änderungen gut bestimmt werden. Ein DMS wird entweder durch *Punktschweißen* (eher selten) oder durch *Kleben* an der Anwendung befestigt. Je nach Temperatur werden *heiß-* oder *kalthärtende Klebstoffe* eingesetzt. Dazu zählen im Wesentlichen Cyanoacrylate, Methylmethacrylate und Epoxidharze. Das Einsatzgebiet wird häufig durch die Temperaturbeständigkeit der Klebstoffe bestimmt.

Die Widerstandsänderung ΔR wird meist durch eine *Wheatstonesche Brückenschaltung* bestimmt (Bild 2.2-3).

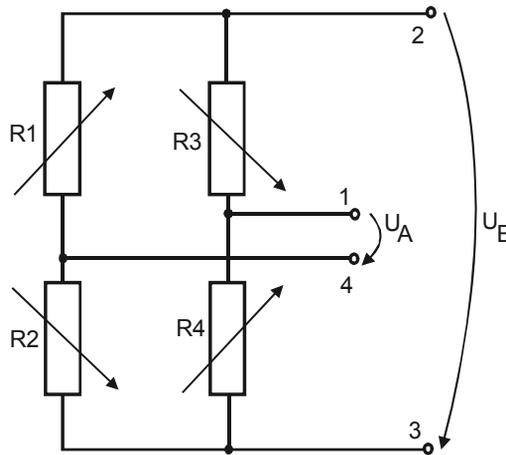


Bild 2.2-3 Wheatstonesche Brückenschaltung

In den vier Zweigen der Brückenschaltung befinden sich die Widerstände R_1 bis R_4 . An den Punkten 2 und 3 wird eine *Brückenspeisespannung* U_B angelegt, die zu einer *Brückenausgangsspannung* U_A führen kann. Die Spannungen U_A und U_B teilen sich in den beiden Brückenteilen R_1 und R_2 sowie R_3 und R_4 folgendermaßen auf:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4}.$$

Für den Fall, dass alle Widerstände gleich groß sind, ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4$), ist die Brücke *abgeglichen*, d. h. $U_A = 0$, und es gilt: $R_1/R_2 = R_4/R_3$.

Wenn sich die Widerstände ändern, so tritt eine Ausgangsspannung U_A auf. Ist zusätzlich die Änderung relativ klein ($\Delta R_i \ll R_i$), wie es bei den DMS der Fall ist, so gilt:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right).$$

Mit $\frac{\Delta R}{R} = k \varepsilon$ gilt: $\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4).$

Das bedeutet: Es subtrahieren sich die Änderungsbeiträge benachbart liegender DMS, wenn sie gleiches Vorzeichen haben. Bei verschiedenem Vorzeichen addieren sie sich.

Anwendungen

Nach Bild 2.2-4 unterscheidet man bei den Anwendungen zwei Hauptgebiete:

- Aufnehmer für die *mechanischen Messgrößen*: Masse, Kraft, Drehmoment und Druck (Abschnitt 4) und
- Möglichkeiten der *experimentellen Analyse*. Diese Analysen finden sowohl in Forschung und Entwicklung zur Optimierung von Werkstoffen und deren Einsatzbereiche Eingang, als auch in der Praxis in den Branchen Automobilbau, Luft- und Raumfahrt, im Schienenbereich sowie im Bauwesen (z. B. Setzungen oder geodynamische Kontrollmessungen im Tunnelbau). Häufig dienen Spannungsanalysen dazu, die Spannungs-Simulationen mit Finiten Elementen experimentell zu überprüfen.

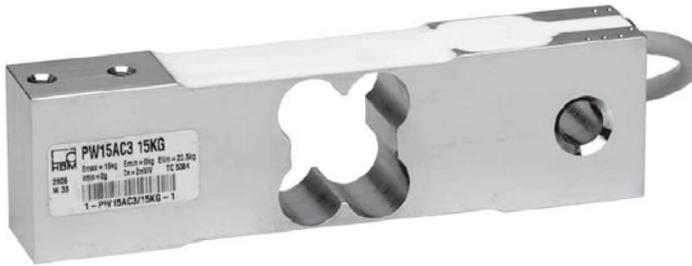


Bild 2.2-4 Anwendungsgebiete der DMS-Biegebalken (Werkfoto: HBM)

2.2.3 Piezoresistiver Effekt und dessen Anwendung durch Silicium-Halbleiter-Elemente

Wegen der Anisotropie des Si-Kristalls sind die Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes auch stark richtungsabhängig. Dies beschreibt der *Tensor* der *piezoresistiven Konstanten*:

$$\begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix}.$$

Es sind r_i die Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes: $r_i = \Delta\rho_i/\rho_i$ und π_{ij} die *piezoresistiven Konstanten*. Diese hängen von der Kristallrichtung, der Dotierung (n-Typ oder p-Typ) und von der Temperatur ab. Tabelle 2.2-2 zeigt die Werte für Raumtemperatur.

Tabelle 2.2-2 Piezoresistive Konstanten in Abhängigkeit von der Richtung und der Dotierung (bei Raumtemperatur: $T = 300$ K)

	ρ in Ωcm	π_{11} in 10^{-11} Pa^{-1}	π_{12} in 10^{-11} Pa^{-1}
p-Si	7,8	6,6	-1,1
n-Si	11,7	-102	53,4

Als groben Richtwert kann man bei Silicium erwarten, dass bei einer Spannung σ von 1 GPa die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes $\Delta\rho/\rho$ etwa 10 % beträgt.

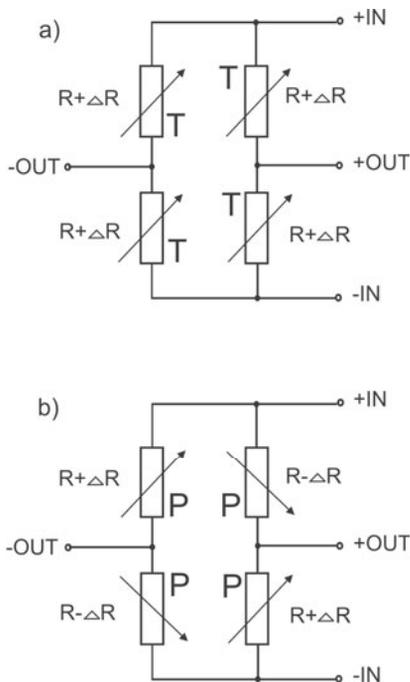
Materialien

Das wichtigste Material ist Silicium. Folgende Parameter bestimmen, wie bereits erwähnt, die Eigenschaften des piezoelektrischen Effektes:

- Dotierungsart (p- oder n-Dotierung),
- Dotierungsdichte und
- Kristallrichtung und Temperatur.

Die Belastungsfälle Zug und Druck, Biegung und Torsion sowie deren Überlagerungen ergeben Belastungsfälle, die in kartesischen Koordinaten als Zug- und Schubspannungen darstellbar sind (Abschnitt 4.3).

Die Messzellen bestehen im Wesentlichen aus vielen, auf einem Silicium-Chip aufgebracht Widerständen. Ihr Einsatzbereich liegt bei einer Temperatur zwischen -50 °C und $+150\text{ °C}$. Bei höheren Temperaturen wird die *SOS-Technik* (SOS: Silicon on Sapphire) eingesetzt, bei der die Widerstände auf einem Isolator (in diesem Fall ein Saphir) aufgebracht werden und nicht in das Siliciumsubstrat eindiffundiert sind.



Ist der Tensor der piezoresistiven Konstanten bekannt, dann können *Membrane* in den Chip integriert werden. Ort und Richtung der Widerstände und Membrane relativ zur Kristallrichtung im Silicium-Chip bilden den Sensor. Durch Druck oder durch Spannung wird die Membrane ausgelenkt, wodurch sich eine Widerstandsänderung ergibt. Weil die Halbleiterwiderstände stark temperaturabhängig sind, wird in der Regel eine Beschaltung zu einer *Wheatstoneschen Brücke* vorgenommen (Bild 2.2-3). Bild 2.2-5 zeigt, wie der Einfluss der Temperatur kompensiert werden kann (Teilbild a)) und wie ein äußerer Druck vom Sensor als Änderung des Widerstandes gemessen werden kann.

Bild 2.2-5

Wheatstonesche Brückenschaltung a) zur Kompensierung der Temperatur; b) zur Messung des Druckes

Die Brückenschaltung bietet folgende, in der Praxis häufig verwendete Möglichkeiten:

- vier Widerstände im Randbereich der Membrane (z. B. messen zwei Radialspannungen und zwei Tangentialspannungen),
- vier Widerstände im Zentrum der Membrane und
- je zwei Widerstände im Randbereich und zwei im Zentrum der Membrane.

Anwendungen

Der piezoresistive Effekt wird zur Messung von *Druck*, *Kraft*, *Drehmoment* und *Dehnung* (Abschnitt 4) verwendet. Silicium-Sensoren haben folgende Besonderheiten:

- *höhere Genauigkeit* als andere Materialien und Methoden, insbesondere die der Dehnmessstreifen (DMS; Abschnitt 2.4),
- sehr kostengünstige Herstellungsweise (etwa 10-mal günstiger als Dünnschichtsensoren oder DMS)
- Begrenzung der maximalen messbaren Kraft auf 1 GN und
- begrenzte Verformbarkeit, da Silicium ein sprödes Material ist.

2.3 Magneto-resistiver Effekt

2.3.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung

Wird an einen Werkstoff, durch den ein Strom fließt, ein äußeres Magnetfeld angelegt und es ändert sich dadurch der elektrische Widerstand, so liegt ein magneto-resistiver Effekt vor. Die Stärke des magneto-resistiven Effektes $\Delta R/R$ wird durch den Quotienten aus der Änderung des Widerstandes ($R(H) - R(0)$) und des Widerstandes ohne Magnetfeld $R(0)$ beschrieben:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)}$$

$R(H)$: elektrischer Widerstand in einem Magnetfeld H .

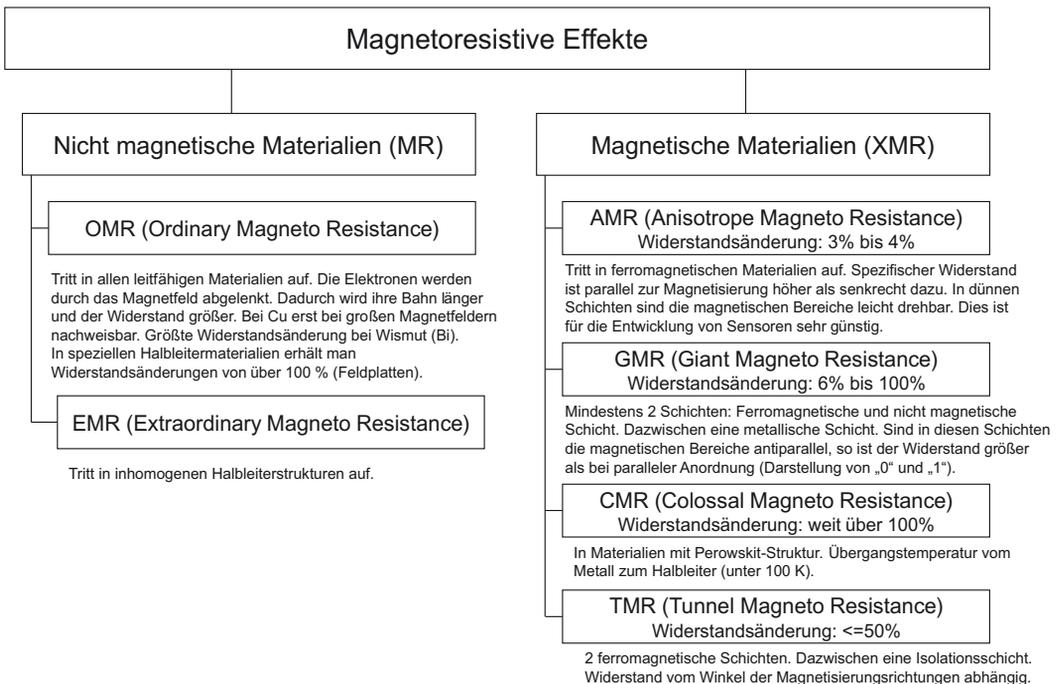


Bild 2.3-1 Übersicht über magneto-resistive Effekte