

Ekbert Hering | Gert Schönfelder (Hrsg.)

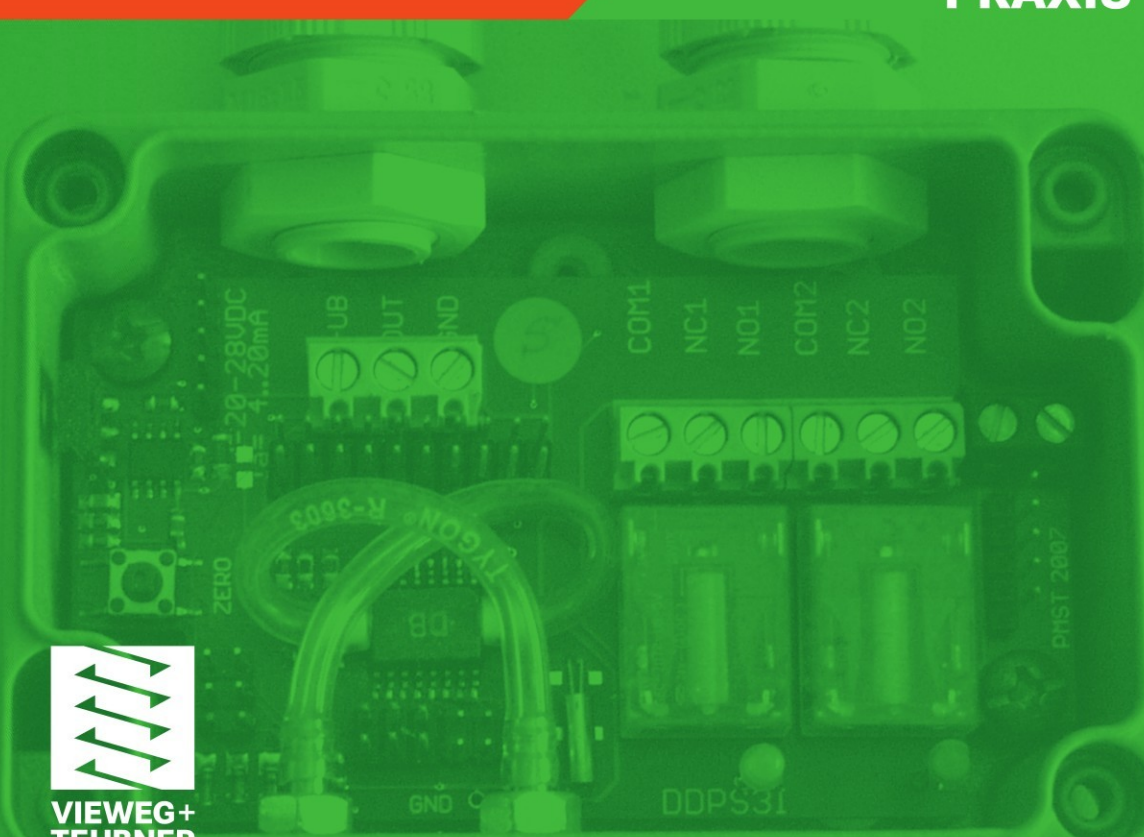
# Sensoren in Wissenschaft und Technik

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

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



# Inhaltsverzeichnis

|   |          |
|---|----------|
| Vorwort .....   | V        |
| Herausgeber und Autoren .....   | VII      |
| <b>1 Sensorsysteme .....</b>  | <b>1</b> |
| 1.1 Definition und Wirkungsweise .....  | 1        |
| 1.2 Einteilung .....  | 2        |
| <b>2 Physikalische Effekte zur Sensornutzung .....</b>  | <b>3</b> |
| 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<br>Dehnmess-Streifen (DMS) .....           | 8        |
| 2.2.3 Piezoresistiver Effekt und dessen Anwendung durch<br>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 Magnetostruktiver Effekt .....  | 21       |
| 2.4.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung .....                                   | 21       |
| 2.4.2 Vorteile der magnetostruktiven Sensor-Technologie .....                                 | 22       |
| 2.4.3 Anwendungen der magnetostruktiven 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 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| <b>3</b> | <b>Geometrische Größen</b> .....   | 127 |
| 3.1      | Weg- und Abstandssensoren .....  | 127 |
| 3.1.1    | Induktive Abstands- und Wegsensoren .....                                      | 128 |
| 3.1.1.1  | Funktionsprinzip und morphologische Beschreibung<br>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<br>Kern (LVDT) .....            | 140 |
| 3.1.1.5  | Gepulster induktiver Linear-Positionssensor<br>(Micropulse®BIW) .....          | 145 |
| 3.1.1.6  | Signalverarbeitung durch Phasenmessung (Sagentia) .....                        | 148 |
| 3.1.1.7  | PLCD-Wegsensoren (Permanent Linear Contactless<br>Displacement Sensor) .....   | 152 |
| 3.1.1.8  | Berührungslose magnetoinduktive Wegsensoren<br>(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<br>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<br>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        |
| <b>4</b> | <b>Mechanische Messgrößen .....</b>   | <b>313</b> |
| 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        |
| <b>5</b> | <b>Zeitbasierte Messgrößen</b> .....                                    | <b>340</b> |
| 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        |
| <b>6</b> | <b>Temperaturmesstechnik</b> .....                                      | <b>378</b> |
| 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        |
| <b>7</b> | <b>Elektrische und magnetische Messgrößen .....</b>                      | <b>405</b> |
| 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        |
| <b>8</b> | <b>Radio- und fotometrische Größen .....</b>                             | <b>441</b> |
| 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        |
| <b>9</b>  | <b>Akustische Messgrößen</b> .....                                       | <b>461</b> |
| 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        |
| <b>10</b> | <b>Klimatische und meteorologische Messgrößen</b> .....                  | <b>471</b> |
| 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<br>und Wasserdampf ..... | 487        |
| 10.2.2.3  | Messung des Saugdruckes in feuchten Materialien<br>(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        |
| <b>11</b> | <b>Ausgewählte chemische Messgrößen .....</b>                       | <b>509</b> |
| 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        |
| <b>12</b> | <b>Biologische und medizinische Sensoren .....</b>                  | <b>547</b> |
| 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        |
| <b>13</b> | <b>Messgrößen für ionisierende Strahlung .....</b>           | <b>583</b> |
| 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        |
| <b>14</b> | <b>Fotoelektrische Sensoren .....</b>                        | <b>609</b> |
| 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    | Bildaufnahmeröhren .....                                     | 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        |
| <b>15</b> | <b>Signalaufbereitung und Kalibrierung .....</b>             | <b>629</b> |
| 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        |

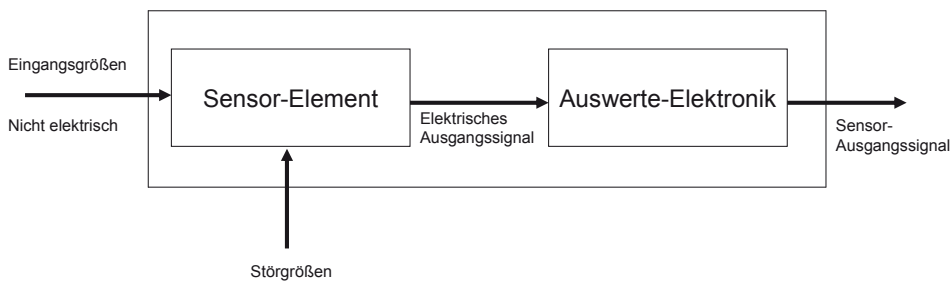
|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 15.2      | Sensorkalibrierung .....   | 632        |
| 15.2.1    | Passive Kompensation .....   | 633        |
| 15.2.2    | Justage mit analoger Signalverarbeitung .....                      | 633        |
| 15.2.3    | Justage mit digitaler Signalverarbeitung .....                     | 634        |
| 15.3      | Energiemanagement bei Sensoren .....                               | 636        |
|           | Weiterführende Literatur .....                                     | 638        |
| <b>16</b> | <b>Interface</b> .....   | <b>639</b> |
| 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 <sup>2</sup> C .....   | 651        |
| 16.2.8    | SPI .....  | 652        |
| 16.2.9    | IEEE 1451 .....  | 653        |
|           | Weiterführende Literatur .....                                     | 656        |
| <b>17</b> | <b>Sicherheitsaspekte bei Sensoren</b> .....                       | <b>657</b> |
| 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        |
| <b>18</b> | <b>Messfehler, Messgenauigkeit und Messparameter</b> .....         | <b>670</b> |
| 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.

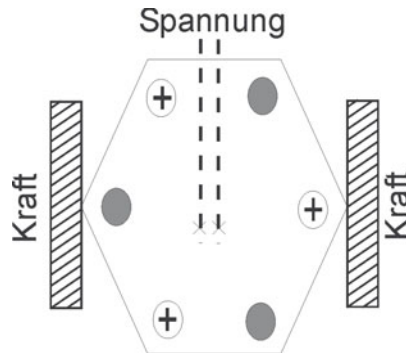
Werden aus den Messwerten realer Sensor-Elemente mittels Software die gewünschten Messgrößen errechnet, dann spricht man von *virtuellen* Sensoren. Diesen liegen ein umfangreiches *mathematisches Rechenmodell* oder auch *empirisch erfasste Zusammenhänge* zugrunde (z. B. das subjektive Hörempfinden). 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

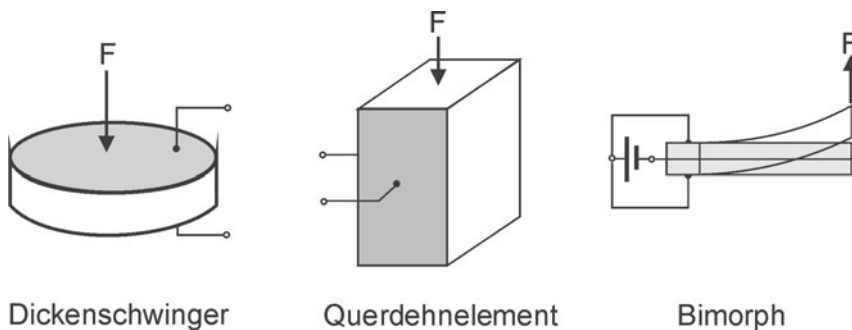
#### 2.1.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung

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.



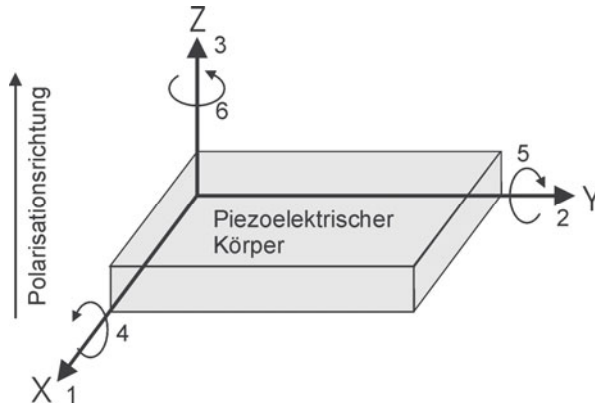
**Bild 2.1-1** Prinzip des longitudinalen, piezoelektrischen Effektes

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 Polarisation  $P$  und der Spannung  $\sigma$  gilt:

$$P = e \sigma,$$

wobei  $e$  der *piezoelektrische Dehnungskoeffizient* ist und für  $\sigma$  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*

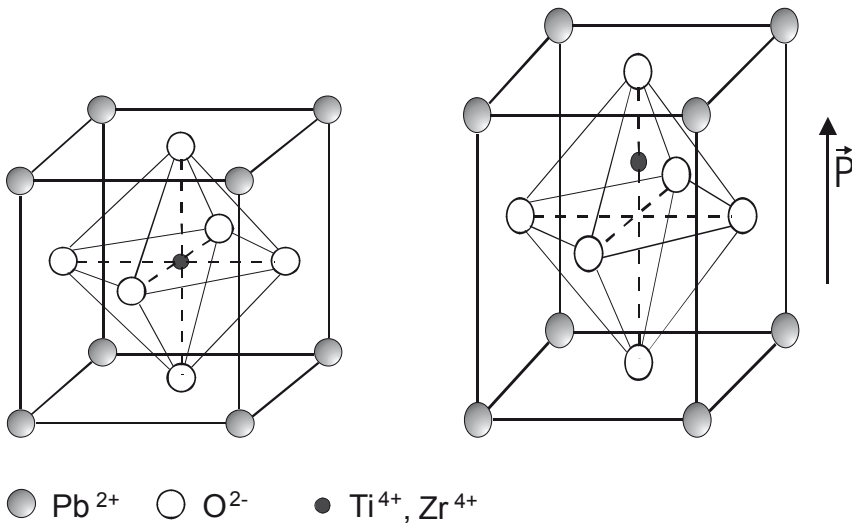
Dazu gehören der  $\alpha$ -Quarz ( $\text{SiO}_2$ ), Turmalin, Lithiumniobat ( $\text{LiNbO}_3$ ), Lithium-Tantalat ( $\text{LiTaO}_3$ ), Gallium-Orthophosphat ( $\text{GaPO}_4$ ), Bariumtitanat ( $\text{BaTiO}_3$ : BTO) und Blei-Zirkonat-Titanat ( $\text{Pb}_0\text{,Ti/Zr}$ : PZT). Diese Kristalle 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 ( $\text{ZnO}$ ) oder Aluminiumnitrid ( $\text{AlN}$ ), durch die Halbleitertechnologie als Dünnschichten auf Silicium abzuscheiden. Ebenfalls im Einsatz befindet sich Polyvinylidenfluorid (PVDF).



**Bild 2.1-4** Perowskit-Struktur der piezoelektrischen Keramiken

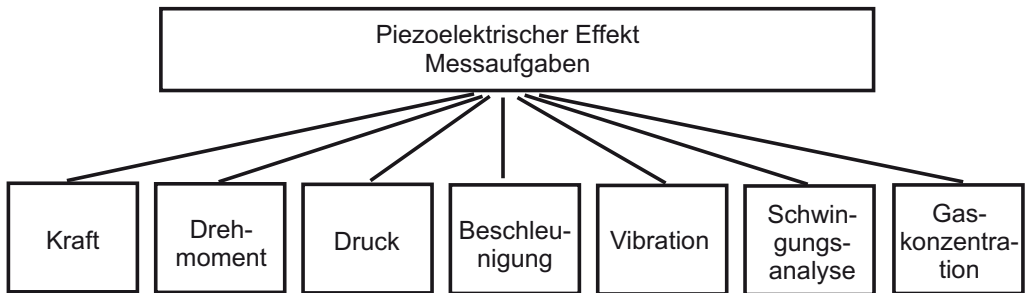
Tabelle 2.1-1 zeigt den piezoelektrischen Koeffizienten ausgewählter Materialien.

**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:

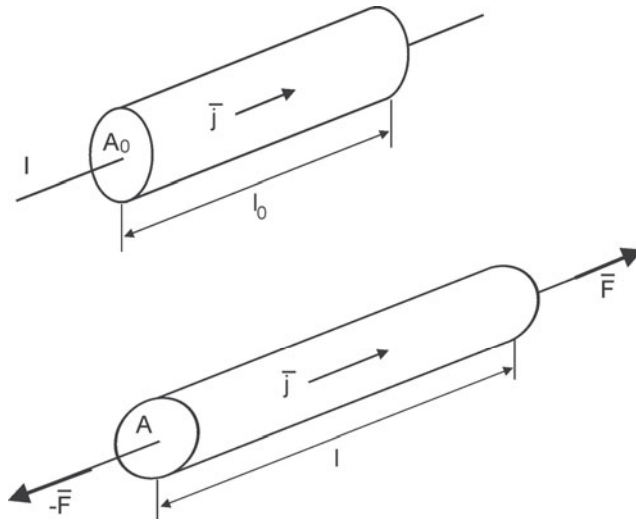
- Einspritzdüsen für Dieselmotoren,
- Druckköpfe in Tintenstrahldruckern,
- Mikro- und Nano-Positioniersysteme und
- Mikroskopie (Rasterelektronen-, Rasterkraft- und Rastertunnelmikroskope).

## 2.2 Resistiver und piezoresistiver Effekt

### 2.2.1 Funktionsprinzipien und physikalische Beschreibung

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

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

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

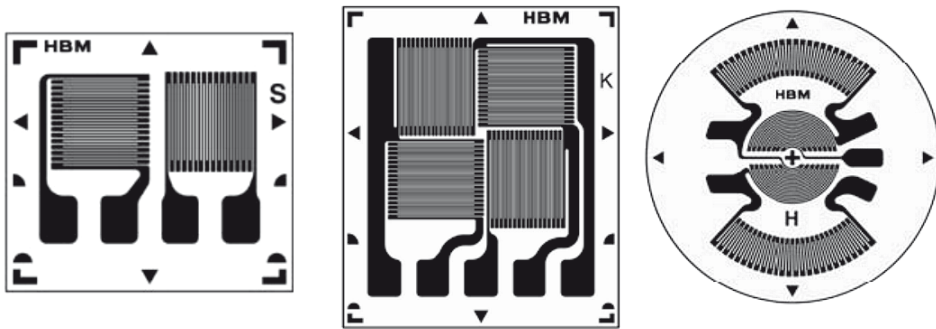
Die Widerstandsänderung errechnet sich dann zu:

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

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  $\rho$  bei Anlegen einer Spannung  $\sigma$  (*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  $\mu\text{m}$  bis 8  $\mu\text{m}$  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)

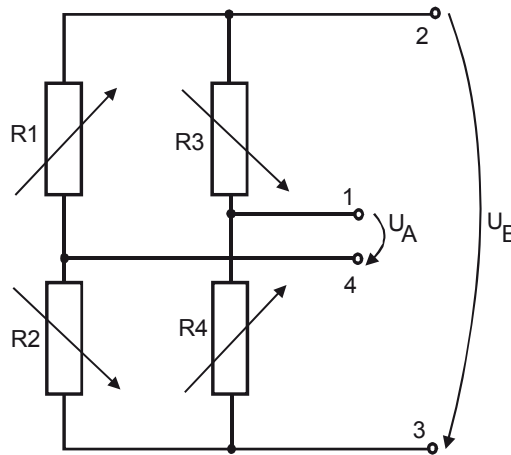
Tabelle 2.2-1 zeigt die  $k$ -Faktoren verschiedener DMS-Werkstoffe.

**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  $\Delta R$  einer handelsüblichen DMS ist relativ klein. Bei einem DMS von  $120 \Omega$  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  $\Delta R$  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:

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

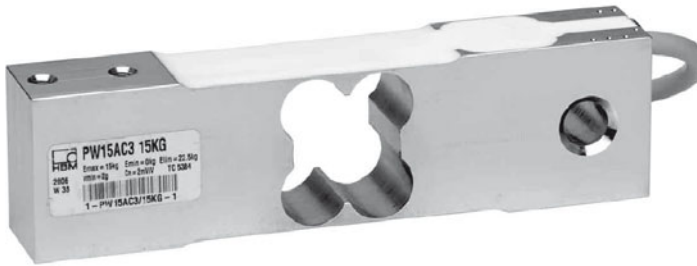
Mit  $\frac{\Delta R}{R} = k \varepsilon$  gilt:  $\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4).$

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  $\pi_{ij}$  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)

|      | $\rho$ in $\Omega\text{cm}$ | $\pi_{11}$ in $10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$ | $\pi_{12}$ in $10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$ |
|------|-----------------------------|--|--|
| 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  $\sigma$  von 1 GPa die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes  $\Delta\rho/\rho$  etwa 10 % beträgt.

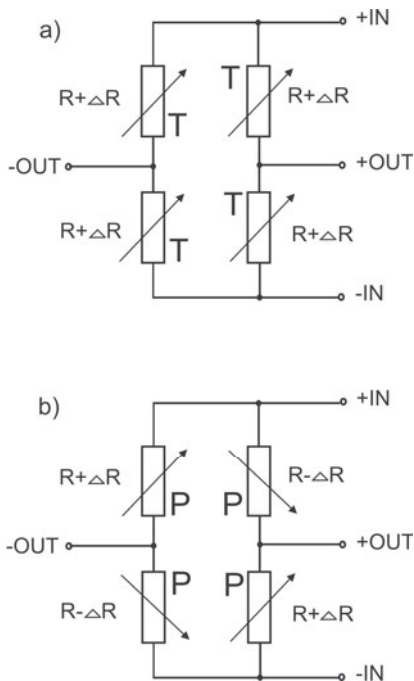
### Materialien

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  $-50\text{ °C}$  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.

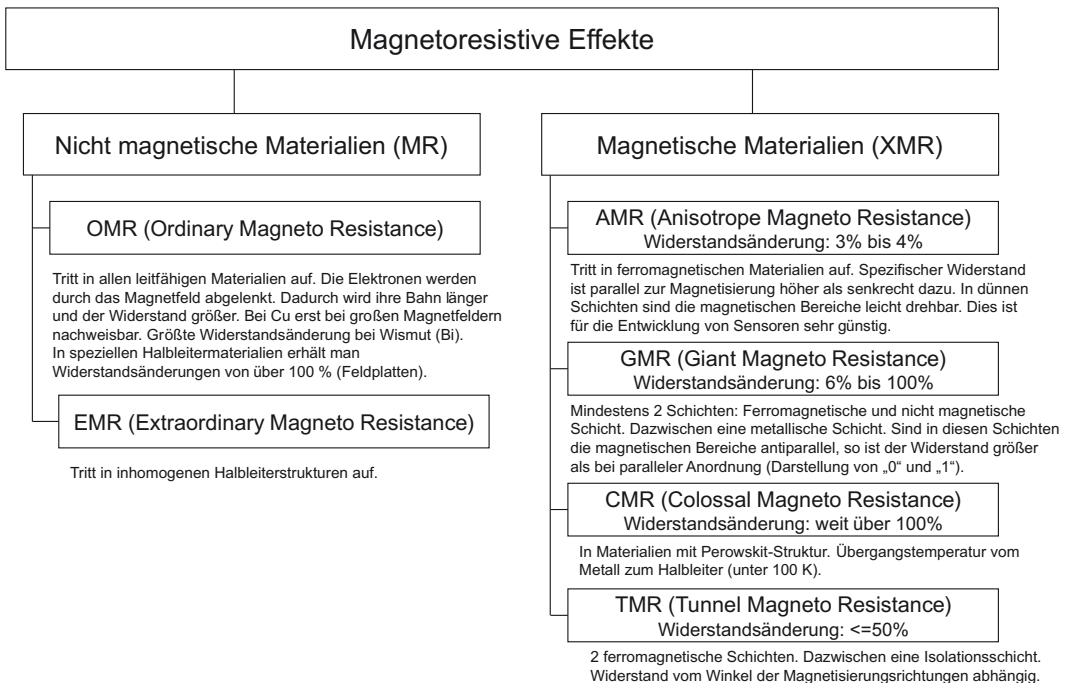
## 2.3 Magneto-resistiver Effekt

### 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