

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 Magnetoresistiver 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	Potenziometrische 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	Redoxglaselektroden	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	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
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 Funktionsüberwachung	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