

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Begriffe der Sensormesstechnik, Sensorfertigung und Sensoranwendung	17
1.1 Systematik der Sensorsignale	17
1.2 Vom Elementarsensor zum Sensorsystem	19
1.3 Sensorterminologie und Sensortechnologie	21
1.4 Messtechnische Begriffe der Sensorik	22
1.5 Messabweichungen für Einzelmesswerte und Messwertverknüpfungen	23
1.5.1 Systematische Messabweichungen bei Einzelmesswerten ...	24
1.5.2 Zufällige Messabweichungen bei Einzelmesswerten	25
1.5.3 Messunsicherheiten	27
1.5.4 Fehlerfortpflanzung von Messabweichungen bei Messungen ..	29
1.6 Messabweichungen bei Messketten	33
1.7 Messtechnische Eigenschaften von Sensoren und Messmitteln	33
1.7.1 Statische Messabweichungen	33
1.7.2 Dynamische Messabweichungen	43
1.7.3 Korrektur statischer und dynamischer Messabweichungen ..	61
1.8 Störsicherheit und Zuverlässigkeit	61
1.9 Praktische Zusammenstellung und Auswahlkriterien für Messgrößen und Sensoren	62
1.9.1 Zusammenstellung von Sensor- und Messgrößenanwendungen	62
1.9.2 Auswahlkriterien für Sensorentwicklungen und Sensoranwendungen	62
2 Mechanoresistive Sensoren	65
2.1 Positionsresistive Sensoren (resistive Aufnehmer / Sensoren)	65
2.1.1 Linearpotentiometer und Winkelpotentiometer	65
2.2 Dehnungsresistive Sensoren (dehnungsresistive Aufnehmer)	72
2.2.1 Metall-DMS und Halbleiter-DMS	73
2.2.2 Piezoresistive mikroelektromechanische Sensoren	97
3 Elektromechanische Induktionssensoren	107
3.1 Induktionsspulensensor (Pick-up) (Induktionssensor)	108
3.2 Schwingpulensensor (Schwingspule)	114
3.3 Magnetflussspulensensoren	117
3.4 Differentialtransformator (LVDT: linearer variabler Differentialtransformator)	120
3.5 Resolver	127
3.6 Inductosyn	127
4 Elektromechanische Induktivsensoren	129
4.1 Längsanker-1-Spulen-Sensor (Längsankeraufnehmer, induktiver Wegsensor, Wegaufnehmer)	131
4.2 Längsanker-Differenzspulensensor (Längsanker-Differenzwegaufnehmer)	132
4.3 Queranker-1-Spulen-Sensor (Querankeraufnehmer)	142

4.4	Queranker-Differenzspulensensor (Differential-Querankeraufnehmer, Differential-Queranker-Geber) . . .	144
5	Elektromechanische Wirbelstromsensoren	149
5.1	Längsanker-Wirbelstromsensor (Wirbelstrom-Längsankersensor) . . .	149
5.2	Queranker-Wirbelstromsensor (Wirbelstrom-Querankeraufnehmer) .	150
6	Induktive Positionssensoren (Näherungsschalter/Initiatoren)	153
6.1	Induktive Initiatoren	154
6.2	Wirbelstrominitiatoren	155
7	Magnetfeldsensoren	165
7.1	WIEGAND-Sensoren und Impulsdrähte	165
7.2	Magnetfeldsensoren mit amorphen Metallen	169
7.2.1	Magnetfeldpositionssensoren	170
7.3	Galvanomagnetische Sensoren	176
7.3.1	Galvanomagnetische Effekte und Technologien	176
7.3.2	HALL-Sensoren und HALL-Differenzsensoren	178
7.3.3	Magnetoinduktions-Durchflusssensoren (MID)	190
7.3.4	Feldplatte (FP) und Differenzfeldplatte (FFP)	195
7.4	XMR-Sensoren	204
7.4.1	IMR-Sensoren (isotrope magneto-resistive Sensoren)	205
7.4.2	AMR-Sensoren ohne Strukturgeometrie	205
7.4.3	AMR-Sensoren mit Strukturgeometrie	208
7.4.3.1	AMR-Sensoren mit BARBER-Pol-Strukturgeometrie (Version BARBER-Pole) (AMR-Sensoren mit BARBER-Polen, BARBER-Pol-Sensor, Widerstandstreifen mit BARBER-Polen)	208
7.4.3.2	AMR-Sensoren mit speziell optimierter Barber-Pol-Strukturgeometrie (Version Pseudo-HALL) (Pseudo-HALL-Sensoren) . . .	211
7.4.4	GMR-Sensoren	221
7.4.5	GMI-Sensoren	233
7.4.6	CMR-Sensoren	233
7.4.7	TMR-Sensoren	234
7.4.8	Nanomagnetfeldsensoren (Nanosensoren)	234
7.5	SQUID-Sensoren	234
8	Reedsensoren	237
9	Magnetoelastische Sensoren	247
9.1	Magnetoelastischer Effekt und Technologie	247
9.2	Pressduktoren	248
9.3	Magnetoelastisch-induktive Krafelementarsensoren (magnetoelastische Kraftsensoren / Kraftaufnehmer)	248
9.4	Magnetoelastische Druckelementarsensoren (magnetoelastische Drucksensoren / Druckaufnehmer)	249
9.5	Magnetoelastische Drehmomentelementarsensoren (magnetoelastische Drehmomentsensoren / Drehmomentaufnehmer) . . .	250
10	Kapazitive Sensoren	259
10.1	Kapazitive EMS-Sensoren	259
10.1.1	Kapazitive EMS-Differenzwegsensoren (kapazitive Wegsensoren)	260

10.1.2	Kapazitive EMS-Drucksensoren (kapazitive Drucksensoren)	261
10.1.3	Kapazitive EMS-Füllstandsensoren (kapazitive Füllstandsensoren)	262
10.1.4	Kapazitive MEMS-Näherungsschalter (kapazitive Näherungsschalter)	264
10.1.5	Elektrische und elektronische Schaltungen für kapazitive Elementarsensoren	265
10.2	Kapazitive MEMS-Sensoren	270
10.2.1	Kapazitive MEMS-Drucksensoren	271
10.2.2	Kapazitive MEMS-Beschleunigungssensoren	273
10.3	Applikationsbeispiele abgewandelter MEMS-Sensortypen	280
10.3.1	Kapazitive MEMS-Vibrationselementarsensoren	281
10.3.2	Kapazitive MEMS-Neigungswinkelsensoren (Inklinometer) (kapazitive Neigungswinkelsensoren, MEMS-Inclinometer)	281
10.3.3	Kapazitive MEMS-Drehratensensoren (Gyroskope) (kapazitive Drehratensensoren, kapazitives monolithisches Gyroskop, mikromechanische Inertialsensoren, Gyrometer) ...	283
10.3.4	EMS-Mikrofone (MEMS-Schallsensoren)	290
11	Piezoelektrische Sensoren	293
11.1	Physikalische, mathematische, technologische und messtechnische Grundlagen	293
11.2	Technische Bauformen von piezoelektrischen Elementarsensoren ...	299
11.2.1	Piezoelektrische Kraftelementarsensoren (piezoelektrische Kraftsensoren / Kraftaufnehmer)	299
11.2.2	Piezoelektrische Druckelementarsensoren (piezoelektrische Drucksensoren / Druckaufnehmer)	300
11.2.3	Piezoelektrische Beschleunigungselementarsensoren (piezoelektrische Beschleunigungssensoren / Beschleunigungsaufnehmer)	300
11.3	Elektronische Auswerteschaltungen für piezoelektrische Elementarsensoren	302
11.3.1	Spannungsverstärker (Elektrometerverstärker)	302
11.3.2	Ladungsverstärker	303
11.3.3	ICP-Sensoren	305
11.4	Technische Daten ausgewählter piezoelektrischer Sensoren	306
12	Optische und optoelektronische Sensoren	315
12.1	Optische und elektrophysikalische Grundlagen	315
12.2	Photoelektrische Effekte	315
12.3	Sensoreffekte	319
12.4	Photozelle (Vakuumphotozelle)	319
12.5	Photomultiplier (Sekundär-Elektronenvervielfacher)	321
12.6	Photowiderstand (photoresistiver Elementarsensor)	322
12.7	Photodioden und Photoelemente	325
12.7.1	PN-Photodioden	325
12.7.2	Photoelemente	328
12.8	Positionempfindliche Photodioden (PSD – Position Sensitiv Detector)	329
12.8.1	Lateraleffekt-PSD (Lateraleffekt-Photodiode)	330
12.8.2	Segmentierte PSD (segmentierte Photodiode)	332

12.9	Bildsensoren (CCD, CMOS)	332
12.9.1	CCD-Bildsensoren	333
12.9.2	CCD-Farbsensoren	334
12.9.3	Weiterentwicklungen	334
12.10	Lichtwellenleiter (LWL) (Glasfasern)	334
12.10.1	Lichtwellenleitertypen (Multimode, Monomode, geometrisch)	335
12.11	Optische und optoelektronische Sender	338
12.11.1	Glühlampen und Metaldampflampen	338
12.11.2	Lichtemittierende Dioden (LED)	339
12.11.3	Halbleiterdiodenlaser (Injektionslaser)	340
12.12	Optische und optoelektronische Anwendungen	341
12.12.1	Lichtschranken	341
12.12.2	Reflexastköpfe (Reflexlichtschranken, optische Reflexastköpfe)	343
12.12.3	Störunterdrückung bei Lichtschranken und Tastköpfen	343
12.12.4	Lasertriangulationssensoren	344
12.12.5	Inkrementale Messeinrichtungen (Weg, Winkel, Drehzahl) (inkrementale Sensoren, incremental length or angle measuring device)	345
12.12.6	Hybridoptische Sensoren (Abstand, Druck, Füllstand)	347
12.13	Faseroptische Sensoren (Monomode, 2-Strahl-Interferometer, Kreisel)	350
12.13.1	Monomodesensorik	351
12.13.2	2-Strahl-Interferometer (MICHELSON, MACH-ZEHNDER, Kreisel) (Zweistrahlinterferometer)	352
13	Temperatursensoren	361
13.1	Kontaktthermometrie	361
13.1.1	Temperaturmessung in und an Festkörpern	361
13.1.2	Temperaturmessung in Flüssigkeiten	362
13.1.3	Temperaturmessung in Gasen und Dämpfen	362
13.2	Kontaktthermometrische Sensoren	362
13.2.1	Thermoresistive Metallsensoren (Metallwiderstandsthermometer) (thermoresistive Sensoren, Widerstandsthermometer)	363
13.2.2	Thermoelektrische Sensoren (Thermoelemente)	372
13.3	Strahlungsthermometrie	385
13.3.1	Gesamtstrahlungspyrometer	385
13.3.2	Teilstrahlungspyrometer	386
14	Schallsensoren (Schallmikrofon)	387
14.1	Allgemeine Grundlagen	387
14.1.1	Physikalische Einteilung der Schallfrequenzbereiche	387
14.1.2	Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Schalls in verschiedenen Medien	387
14.1.3	Schallfeld	388
14.2	Hörschallsensoren (Luftschallsensoren)	391
14.2.1	Elektrodynamische Hörschallsensoren (elektrodynamisches / dynamisches Mikrofon)	392
14.2.2	Elektromagnetische Hörschallsensoren (dynamisches Luftschallmikrofon)	395

14.2.3	Elektrostatische Hörschallsensoren (Kondensatormikrofon) Kondensatormikrofone (elektrostatischer Schallsensor)	396
14.2.4	Piezoelektrische Hörschallsensoren (piezoelektrisches Mikrofon / Piezomikrofon)	403
14.3	Spezielle Schallsensoren	406
14.3.1	Körperschallsensoren	406
14.3.2	Wasserschallsensoren (Hydrophone)	407
14.4	US-Sensoren (Ultraschallsensoren)	408
14.4.1	US-Abstandsensoren (Ultraschall-Abstandsensoren)	409
14.4.2	US-Füllstandsensoren (Ultraschall-Füllstandsensoren)	413
14.4.3	US-Durchflusssensoren (Ultraschall-Durchflusssensoren)	415
14.4.4	US-Volumenstrommessung	418
14.4.5	Akustische und US-Mikroskope (Ultraschall-Mikroskope)	419
15	Pneumatische Sensoren	421
15.1	Staudrucksensoren (Staudüsen) (pneumatische Staudruckgeber)	421
15.2	Ringstrahlsensoren (Ringstrahldüsen)	422
15.3	Pneumatische Luftschrankensensoren (Luftschranke)	423
16	Kerntechnische Strahlungssensoren (kernphysikalische Sensoren)	427
16.1	Sicherheitstechnik	433
16.2	Kernstrahlungsdetektoren (Kernstrahlungssensoren) in der Technik	435
16.2.1	Ionisationskammern	435
16.2.1.1	Ionisationskammer mit Strombetrieb (Stromionisationskammer)	435
16.2.1.2	Ionisationskammer mit Impulsbetrieb (Impulsionisationskammer / -Detektor)	437
16.2.2	Zählrohre	440
16.2.2.1	Proportionalzählrohr	440
16.2.2.2	GEIGER-MÜLLER-Zählrohr (GM-Zählrohr)	443
16.2.3	Halbleiterstrahlungssensoren (Halbleiterdetektoren) (Halbleiterzähler)	448
16.2.3.1	Ge(Li)-Sensor und HPGe-Sensor (-Detektor / -Zähler)	448
16.2.3.2	Volumensperrschicht-Halbleitersensor (Sperrschichtdetektor)	449
16.2.3.3	Oberflächensperrschicht-Halbleitersensor mit pn-Übergang (pn-Oberflächensperrschichtdetektor / -Zähler)	450
16.2.4	Szintillationszähler (Szintillationssensoren)	454
16.3	Zusammenstellung der messtechnischen Eigenschaften und Strahlungssensoren	461
17	Chemosensoren (chemische Sensoren)	463
17.1	Chemische, physikalische und messtechnische Grundbegriffe und Grundlagen	463
17.2	Leitfähigkeitssensoren für Flüssigelektrolyte	468
17.2.1	Konduktive 2-Elektroden-LF-Sensoren für Flüssigelektrolyte (konduktive Sensoren, LF-Sensoren)	472
17.2.2	Konduktive 4-Elektroden-LF-Sensoren für Flüssigelektrolyte (kon- duktive Sensoren, LF-Sensoren)	477
17.2.3	Kontaktfreie, elektrodenlose LF-Induktionssensoren für Flüssigelektrolyte (induktive LF-Sensoren)	479

17.3	Konzentrationsensoren mit ionenselektiven Elektroden für Flüssigelektrolyte (ionenselektive Sensoren)	482
17.3.1	pH-Wert-Sensor mit protonenselektiver Glasmembran (pH-(sensitive) Glasmembran, pH-Meter, pH-Sonden)	488
17.3.2	Konzentrationsensoren mit ionenselektiven Festkörpermembranelektroden (ionenselektive Elektroden)	499
17.3.3	Konzentrationsensoren mit ionenselektiven Flüssigmembranelektroden (ionenselektive Sensoren)	502
17.3.4	Ionenselektive Feldeffekttransistoren (ISFET)	504
17.3.4.1	Messverfahren	510
17.3.4.2	Nicht elektrochemische Sensoren zur pH-Wert-Messung	510
17.4	Redoxpotentialsensoren	510
17.5	Gassensoren	517
17.5.1	Elektrochemische Gassensoren	517
17.5.1.1	Elektrochemische 2- und 3-Elektroden-Zellen (elektrochemische Zwei- und Drei-Elektrodenzelle)	518
17.5.1.2	CLARK-Elektrode	522
17.5.2	Elektronische Gassensoren (Halbleitergassensoren)	525
17.5.2.1	Metalloxid-Halbleitergassensoren	525
17.5.3	Pellistorsensoren (Pellistoren)	533
17.5.4	Metallisolatorgassensoren (metal oxide-based gas sensor, isolated gas sensor)	537
17.5.5	Festkörperelektrolytgassensoren (Festkörper-Gassensoren, Festelektrolyt-Gassensoren)	542
17.5.5.1	NERNST-Sonde (Sauerstoffsensor)	543
17.5.5.2	Lambdasonden	544
18	Feuchtesensoren (Feuchtigkeitsensoren)	551
18.1	Grundbegriffe	551
18.2	Messprinzipien für Feuchtesensoren	552
18.2.1	Chemische Messprinzipien	552
18.2.2	Physikalische Messprinzipien	552
18.3	Messgrößen in der Feuchtemesstechnik	552
18.3.1	Messgrößen für gasförmige Stoffe	552
18.3.2	Messgrößen für flüssige und feste Stoffe	554
18.3.3	Kalibrierung	554
18.4	Messen mit Feuchtesensoren	555
18.4.1	KEIDEL-Messzelle (coulometrischer Feuchtesensor)	555
18.4.2	Lithiumchlorid-(LiCl)-Feuchtesensor	557
18.4.3	Resistive Feuchtesensoren (resistive Keramikhygrometer)	560
18.4.4	Kapazitive Feuchtesensoren	561
18.4.5	Prozesshygrometer	563
18.4.6	Handmessgerät zur Messung von relativer Luftfeuchte und Temperatur	564
18.4.7	Feuchtesensor für den Hochtemperatureinsatz	564
19	Biosensoren (biologische Sensoren)	569
19.1	Grundbegriffe	569
19.2	Systematik der Biosensoren	569
19.2.1	Biophysikosensoren (biophysikalische Sensoren)	570
19.2.2	Biochemosensoren (biochemische Sensoren) (biochemische Sensoren auf Basis enzymatischer Katalyse)	570

19.2.3 Bioelektroniksensoren (bioelektronische Sensoren) (ionensensitive Feldeffekttransistoren – ISFET)	571
19.3 Sensortechnische Applikationen	574
Weiterführende Literatur	579
Patentschriften des Autors	581
Stichwortverzeichnis	585