

Dr. Harry Herold

Sensortechnik

**Sensorwirkprinzipien
und Sensorsysteme**

Hüthig Buch Verlag Heidelberg

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Theoretische Grundlagen	3
1.1 Übersicht der Sensorfunktionsprinzipien	3
1.2 Quantitative Beschreibung des Sensorverhaltens.	7
1.3 Der ideale Sensor	10
1.4 Das allgemeine reale analoge Sensorsystem	11
1.5 Kennfunktionen und Kennwerte des Sensorsystems.	12
1.5.1 Komplexer Frequenzgang, Amplituden- und Phasengang.	12
1.5.2 Übertragungskennlinie, Aussteuerungskennlinie	17
Zeitverhalten	17
1.5.3 Kennwerte des Sensorsystems	18
1.6 Fehlerangaben	19
1.6.1 Statische Fehlerkenngrößen von Meßmitteln	19
1.6.2 Bewertung dynamischer Fehler.	20
2 Analoge Sensoren auf der Basis der Energiewandlung	23
2.1 Prinzipielles - Energieverkopplung	23
2.2 Galvanische Meßgrößenwandlung.	27
2.2.1 Kontaktelektrische Effekte und Kontaktspannung	27
2.2.1.1 Kontaktelektrische Erscheinungen bei Metallen.	28
2.2.1.2 Kontakt Metall - Halbleiter.	30
2.2.1.3 Kontakt Halbleiter - Halbleiter.	31
2.2.1.4 Kontakt Metall - Isolator.	32
2.2.1.5 Kontakterscheinungen an Nichtleitern	33
2.2.2 Thermoelektrische Wandlungseffekte	36
2.2.2.1 Seebeck-Effekt	36
2.2.2.2 Peltier-Effekt	38
2.2.2.3 Ersatzschaltung des thermoelektrischen Wandlers.	38
2.2.2.4 Technische Thermolemente.	39
2.2.2.5 Weitere thermoelektrische Effekte.	42
2.3 Sensoren für mechanische Größen auf der Basis der Energiewandlung.	43
2.3.1 Elektrostatische Wandler	43
2.3.2 Piezoelektrische Wandler	47
2.3.2.1 Die piezoelektrischen Kenngrößen	48
2.3.2.2 Erhöhung der Empfindlichkeit	52
2.3.2.3 Dynamisches Verhalten.	53
2.3.2.4 Ankopplung der piezoelektrischen Schallsender- und Schall- sensorelemente an das schalleitende Medium	56
2.3.3 Elektrodynamische Wandler.	61
2.3.4 Elektromagnetischer Wandler.	64
2.3.5 Magnetostriktiver Wandler.	68

2.4	Optoelektronische Sensoren auf der Basis der Energiewandlung	69
2.4.1	Innerer fotoelektrischer Effekt.	69
2.4.2	Lumineszenz.	70
2.4.3	Sperrschichtfotoelement, Solarzelle, Fotodiode	70
2.5	Pyroelektrische Wandler.	74
2.6	Elektrochemische Wandler - Potentiometrie.	77
2.6.1	Elektrochemische Erscheinungen und Galvani-Urspannung.	77
2.6.2	Potentiometrische Meßverfahren	79
3	Analoge Sensoren mittels Steuerung oder Modulation eines Signals.	85
3.1	Prinzipielles - Energiesteuerung - Modulation	85
3.2	Ohmsche Sensoren.	89
3.2.1	Veränderbare Spannungsteiler - Umlaufpotentiometer.	89
3.2.2	Metalldehnungsmeßelemente	91
3.2.2.1	Piezoresistiver Effekt.	91
3.2.2.2	Einachsiger Spannungszustand.	92
3.2.2.3	Drahtdehnungsmeßstreifen.	92
3.2.2.4	Linearitätsfehler	94
3.2.2.5	Foliendehnungsmeßstreifen	94
3.2.2.6	Befestigung der Dehnungsmeßelemente	97
3.2.2.7	Dehnungsmeßelemente für hohe Temperaturen	98
3.2.2.8	Meßelemente für allseitigen Druck	98
3.2.3	Halbleiterdehnungsmeßelemente	99
3.2.3.1	Piezoresistiver Effekt im Einkristall-Halbleiter.	99
3.2.3.2	Beanspruchungen im Halbleiterdehnungsmeßstreifen.	102
3.2.3.3	Integrierte Halbleiterdehnungsmeßelemente	105
3.2.3.4	Polykristalline Halbleiterdehnungsmeßelemente	106
3.2.3.5	Einkristalline Dehnungsmeßelemente mittels Dünnschichttechnik	107
3.2.4	Zum praktischer Einsatz von Dehnungsmeßelementen.	108
3.2.4.1	Dehnungsübertragung vom Meßobjekt auf Dehnungsmeßelement.	108
3.2.4.2	Abmessungen, Masse, Meßkräfte, Ersatzschaltung.	111
3.2.4.3	Linearität, Hysterese, Kriechen	111
3.2.4.4	Temperatureinfluß, Kompensation des Temperaturfehlers	113
3.2.4.5	Sensorbeispiele mit Dehnungsmeßelementen.	115
3.2.5	Nutzung der Temperaturabhängigkeit der Widerstände.	117
3.2.5.1	Temperaturabhängigkeit metallischer Leiter.	117
3.2.5.2	Temperaturabhängigkeit von Halbleiterwiderständen	120
3.2.5.3	Kaltleiter.	122
3.2.5.4	Transistor als Temperatursensor	123
3.2.5.5	Temperatursensor auf der Basis des Ausbreitungswiderstandes	125
3.2.5.6	Anwendungen von Temperatursensoren.	126
3.2.6	Widerstandsänderung durch Feuchte	129
3.2.6.1	Grundlagen und Verfahren der Feuchtemessung	129
3.2.6.2	LiCl-Taupunkthygrometer	132
3.2.6.3	Leitwerthygrometer.	134
3.3	Galvanomagnetische und thermomagnetische Sensoren	134
3.3.1	Prinzipielles - Übersicht	134
3.3.2	Hall-Effekt und Hall-Sensoren	135
3.3.3	Magnetoresistive Sensoren - Feldplatten	138
3.3.3.1	Halbleiterfeldplatten	138
3.3.3.2	Ferromagnetische Widerstandsstreifen.	140
3.3.4	Ettingshausen-Effekt und Ettingshausen-Nernst-Effekt.	142
3.3.4.1	Ettingshausen-Nernst-Effekt	142
3.3.4.2	Ettingshausen-Effekt.	143
3.3.5	Magnetojunction-Effekt.	143

3.3.6	Galvanomagnetische Strömungsmessung . . . . .	.144
3.4	Induktive Sensoren. . . . .	.145
3.4.1	Prinzipielles . . . . .	.145
3.4.2	Induktivitätsänderung durch Verändern des Luftspaltes . . . . .	.147
3.4.3	Induktivitätsänderung durch Verschieben eines Kernes. . . . .	.151
3.4.4	Differentialtransformatoren mit verschiebbarem Kern . . . . .	.154
3.4.5	Kurzschlußringsensoren. . . . .	.156
3.4.6	Magnetoelastische Sensoren. . . . .	.158
3.4.7	Resolver und Inductosyne. . . . .	.160
3.5	Kapazitive Sensoren . . . . .	.162
3.5.1	Prinzipielles . . . . .	.162
3.5.2	Änderung des Elektrodenabstandes. . . . .	.164
3.5.3	Veränderbare wirksame Elektrodenfläche. . . . .	.166
3.5.4	Veränderbares Dielektrikum. . . . .	.168
3.5.5	Kapazitive Feuchte Sensoren. . . . .	.170
3.5.6	Kapazitive Schutzschirmsensoren . . . . .	.171
3.6	Optoelektronische Sensoreffekte zur Steuerung des elektrischen Energieflusses. . . . .	.175
3.6.1	Allgemeines . . . . .	.175
3.6.2	Strahlungsquellen . . . . .	.176
3.6.2.1	Glühlampen - Halogenlampen. . . . .	.177
3.6.2.2	Lumineszenzdioden . . . . .	.178
3.6.2.3	Laserdioden . . . . .	.179
3.6.3	Lichtwellenleiter . . . . .	.179
3.6.4	Strahlungsempfänger . . . . .	.182
3.6.4.1	Fotowiderstände . . . . .	.182
3.6.4.2	Fotodioden. . . . .	.184
3.6.4.3	Fototransistoren. . . . .	.185
3.6.4.4	Fotozellen. . . . .	.186
3.6.5	Faseroptische Sensoren. . . . .	.187
3.7	Sensoren für Gase - Stoffanalyse. . . . .	.193
3.7.1	Allgemeines . . . . .	.193
3.7.2	Gassensoren auf der Basis der Ionenleitung. . . . .	.195
3.7.2.1	Festelektrolyte . . . . .	.195
3.7.2.2	Ionensensitiver Feldeffekttransistor (FET). . . . .	.198
3.7.3	Änderung der Austrittsarbeit von Elektrodenmaterialien durch nachzuweisende Atome (Moleküle) . . . . .	.199
3.7.4	Änderung der Leitfähigkeit von bestimmten Stoffen durch adsorbierte Atome (Moleküle). . . . .	.200
3.7.5	Erzeugung eines elektrochemischen Potentials an den Elektroden (Redoxpotential) . . . . .	.203
3.7.6	Änderung der Wärmeleitfähigkeit infolge Änderung der Gaskonzentration. . . . .	.204
3.7.7	Wärmetönung infolge Reaktion der nachzuweisenden Atome mit Stoffen an der Sensoroberfläche . . . . .	.205
3.7.8	Feststoff- und Gasanalyse mit elektromagnetischer Strahlung .206	
3.7.8.1	Nutzbare Effekte der Wechselwirkung elektromagnetischer Wellen mit der Materie. . . . .	.206
3.7.8.2	Absorptionsverfahren. . . . .	.207
3.7.8.3	Infrarotspektrometrie . . . . .	.209
3.7.8.4	Halbleiterlaser-Gassensoren . . . . .	.210
3.8	Elektrolytische Leitfähigkeitsmessung - Konduktometrie. . . . .	.211
3.8.1	Physikalische Grundlagen. . . . .	.211
3.8.2	Direkte Messung der Leitfähigkeit . . . . .	.215
3.8.3	Kontaktlose Konduktometrie. . . . .	.218

4	Digitale Sensoren und Sensorsysteme.	221
4.1	Prinzipielles zur theroretischen Beschreibung.	221
4.1.1	Der nichtelektrisch-elektrische Analog-Digital-Umsetzer.	221
4.1.2	Quantisierung.	222
4.1.3	Kodierung.	224
4.1.4	Übertragungsfunktion digitaler Sensoren.	225
4.1.5	Fehlereinflüsse und Zeitverhalten.	228
4.2	Direkte Umsetzung in digitale Größen	230
4.2.1	Kodelineal, Kodescheibe.	230
4.2.2	Fotoelastischer Effekt und die Nutzung zur digitalen Kraftmessung	232
4.3	Digitale Sensorwirkprinzipien nach dem Iterationsprinzip	233
4.3.1	Digitale Drehmoment- und Kraftmessung.	233
4.3.2	Digitale Dichtemessung von Flüssigkeiten nach dem Iterationsprinzip.	234
4.4	Digitale Sensorwirkprinzipien nach dem Abzählverfahren	236
4.4.1	Inkrementelle Längenwandler und Drehwinkelwandler.	236
4.4.2	Weg- und Lagemessung mit Raster- und Moiréstreifen	239
4.4.3	CCD-Sensorzeile.	240
4.4.4	Interferenzoptische Sensorsysteme.	242
4.4.4.1	Interferometrische Längenmessung	242
4.4.4.2	Interferentielle Kraftsensoren	245
4.5	Digitale Sensorwirkprinzipien mit der Zeit als Zwischengröße	247
4.5.1	Digitale Entfernungsmessung und Dickenmessung mittels Laufzeit	247
4.5.2	Digitale Geschwindigkeits- und Durchflußmessung.	249
4.5.3	Digitale Drehmoment- und Torsionswinkelbestimmung.	251
4.5.4	Digitale Kompressibilitätsmessung mittels Impulslaufzeit	252
4.6	Digitale Sensorwirkprinzipien mit der Frequenz als Zwischengröße	254
4.6.1	Eine notwendige Vorbemerkung	254
4.6.2	Digitale Drehzahlmessung	255
4.6.3	Anwendung des Dopplerprinzips zur Geschwindigkeits- und Durchflußmessung	256
4.6.4	Dehnungs-, Torsions- und Kraftmessung mit schwingender Saite	259
4.6.5	Winkelsensor mit Schwingband	261
4.6.6	Massebestimmung mit schwingender Saite oder schwingendem Band	261
4.6.7	Masse- und Feuchtebestimmung mittels Schwingquarzen.	262
4.6.8	Kraft- und Druckmessung mit schwingender Blattfeder, Schwingzylinder oder Blattfeder.	263
4.6.9	Druckmessung mittels Schwingquarzen.	264
4.6.10	Dichtebestimmung mit Schwingelementen.	265
4.6.11	Durchflußmessung mittels selbsterregter Schwingungen	267
4.6.12	Quarzthermometer	269
4.6.13	Sensoren unter Nutzung akustischer Oberflächenwellen	270
5	Sensorelektronik für analoge Sensoren	272
5.1	Grundsätzliches	272
5.2	Verstärkung und Meßsignalübertragung.	273
5.2.1	Operationverstärker - Eigenschaften und Schaltungen	273
5.2.1.1	Idealer Operationsverstärker	273
5.2.1.2	Grundsaltungen des Operationsverstärkers.	274
5.2.1.3	Erweiterte Grundsaltungen	275
5.2.1.4	Steuerbare Spannungs- und Stromquellen, aktive Referenzspannungs- und Referenzstromquellen	276

5.2.1.5	Integrations- und Differentiationsverstärker, Ladungs- verstärker, Strom-Spannungs-Umsetzer. . . . .	.277
5.2.2	Reale Operationsverstärker - Fehlereinflüsse, Bias- und Offsetkorrektur . . . . .	.279
5.2.2.1	Grundsaltungen mit realen Operationsverstärkern . . . . .	.279
5.2.2.2	Frequenzverhalten . . . . .	.282
5.2.2.3	Biasstrom-, Offsetstrom- und Offsetspannungskompensation. . . . .	.284
5.2.3	Störungsfreie analoge Meßsignalübertragung. . . . .	.286
5.2.3.1	Meßsignalübertragung über Leitungen . . . . .	.286
5.2.3.2	Drahtlose Meßsignalübertragung. . . . .	.288
5.3	Amplitudenanaloge Meßverfahren. . . . .	.290
5.3.1	Allgemeine Brückenschaltung . . . . .	.290
5.3.2	Gleichspannungs- bzw. Gleichstrombrücken. . . . .	.292
5.3.3	Wechselspannungsbrücken . . . . .	.298
5.4	Frequenzanaloge Meßverfahren. . . . .	.301
5.4.1	Allgemeines zur Frequenzmodulation in der Meßtechnik. . . . .	.301
5.4.2	Schaltungsstrukturen frequenzanaloger Meßsysteme . . . . .	.306
5.4.3	LC-Oszillatoren mit kapazitiven Sensorelementen . . . . .	.308
5.4.4	RC-Oszillatoren . . . . .	.311
5.4.5	Relaxationsoszillatoren. . . . .	.312
5.4.6	Fehlereinflüsse und Schranken beim frequenzanalogem Meßverfahren. . . . .	.316
6	Rechnerkopplung von Sensorsystemen - "Intelligente Sensorsysteme" . . . . .	.319
6.1	Erwartungen . . . . .	.319
6.2	Wann sind Sensoren intelligent? . . . . .	.319
6.3	Strukturen "intelligenter Sensoren" . . . . .	.320
6.4	Sensorspezifische Meßsignalverarbeitung . . . . .	.322
6.5	Einige Probleme der Selbstkalibrierung und Fehlerkorrektur. . . . .	.325
	Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen. . . . .	.329
	Literaturverzeichnis . . . . .	.332
	Sachwörterverzeichnis. . . . .	.341