
Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Sensorik und in die elektronische Messtechnik	1
1.1	Sensortypen	2
1.1.1	Standardsensoren	5
1.1.2	Messtechnische Grundbegriffe	7
1.1.3	Analoge und digitale Messgeräte	10
1.1.4	Strom und Spannung	19
1.1.5	Widerstände	24
1.2	Kalibrieren von Mess- und Prüfmitteln	26
1.3	Analoge und digitale Messwerterfassung	27
1.3.1	Aufbau einer analogen Messkette	27
1.3.2	Aufbau einer digitalen Messkette	28
1.3.3	Erfassung und Verarbeitung von Messdaten	29
1.3.4	Steuern, Regeln und Visualisieren	33
1.4	Messfehler	38
1.4.1	Fehlerarten	39
1.4.2	Fehlerquellen	47
1.4.3	Einflussfehler	50
1.4.4	Fehlerfortpflanzung	54
1.4.5	Auswahlkriterien für Messeinrichtungen	58
2	Bauelemente der elektronischen Messwerterfassung	61
2.1	Analoge Verstärkerfamilien	64
2.1.1	Interner Schaltungsaufbau von Operationsverstärkern	64
2.1.2	Betriebsarten eines Operationsverstärkers	68
2.1.3	Übertragungscharakteristik bei Operationsverstärkern	70
2.1.4	Invertierende Betriebsart	70
2.1.5	Nicht invertierender Betrieb	74
2.1.6	Spannungsabhängige Stromgegenkopplung	77
2.1.7	Stromabhängige Spannungsgegenkopplung	77
2.1.8	Stromabhängige Stromgegenkopplung	78

2.2	Lineare und nicht lineare Verstärkerschaltungen	79
2.2.1	Addierer bzw. Summierer	79
2.2.2	Operationsverstärker als Integrator	80
2.2.3	Differenzierer mit Operationsverstärker	82
2.2.4	Differenzverstärker oder Subtrahierer	83
2.2.5	Instrumentenverstärker	86
2.2.6	Spannungs- und Strommessung	88
2.3	Komparator und Schmitt-Trigger	89
2.3.1	Einfacher Spannungsvergleich	90
2.3.2	Spannungsvergleich im gesättigten Verstärkerbetrieb	93
2.3.3	Window-Komparator	96
2.3.4	Dreipunktkomparator	98
2.3.5	Schmitt-Trigger	98
2.3.6	Schmitt-Trigger in nicht gesättigter Betriebsart	103
2.3.7	Komparator mit Kippverhalten	105
2.4	Messbrücken	108
2.4.1	Unbelasteter Spannungsteiler	108
2.4.2	Belasteter Spannungsteiler	109
2.4.3	Brückenschaltung	110
2.4.4	Einfache Kapazitätsmessbrücke	112
2.4.5	Wien- und Wien-Robinson-Brücke	115
2.4.6	Maxwell-Brücke	116
2.4.7	Schering-Brücke	117
2.4.8	Maxwell-Wien-Brücke	118
2.4.9	Frequenzunabhängige Maxwell-Brücke	120
2.5	Analogschalter	121
2.5.1	Schalterfunktionen der Analogschalter	124
2.5.2	Operationsverstärker mit digitaler Ansteuerung	128
2.5.3	Sample & Hold-Schaltungen	130
2.6	Analog-Digital- und Digital-Analog-Wandler	136
2.6.1	Aufbau eines Datenerfassungssystems	136
2.6.2	Messdatenerfassung ohne Abtast- und Halteeinheit	140
2.6.3	Zeitmultiplexe Messdatenerfassung mit Abtast- und Halteeinheit	141
2.6.4	Simultane Messdatenerfassung mit Abtast- und Halteeinheit	144
2.6.5	Antialiasing-Filter	145
2.6.6	Systeme zur Signalabtastung	146
2.6.7	Theorem zur Signalabtastung	149
2.7	AD- und DA-Wandler	151
2.7.1	Natürlicher Binärkode	151
2.7.2	Komplementärer Binärkode	153
2.7.3	Codes für AD- und DA-Wandler	153
2.7.4	BCD-Codierung	155

2.7.5	Spezifikationen von Datenumsetzern	156
2.7.6	Relative Genauigkeit bei Wandlersystemen	160
2.7.7	Absolute Genauigkeit bei Wandlern	162
2.8	Digital-Analog-Wandler	166
2.8.1	Übertragungsfunktion	166
2.8.2	Aufbau und Funktion eines DA-Wandlers	170
2.8.3	R2R-DA-Wandler	172
2.8.4	DA-Wandler mit externen Widerständen	174
2.9	Analog-Digital-Wandler	177
2.9.1	AD-Wandler nach dem Zählverfahren	178
2.9.2	AD-Wandler mit Nachlaufsteuerung	180
2.9.3	AD-Wandler mit stufenweiser Annäherung	181
2.9.4	Single-Slope-AD-Wandler	185
2.9.5	Dual-Slope-AD-Wandler	186
2.9.6	Spannungs-Frequenz-Wandler	188
3	Temperatursensoren	193
3.1	Grundsätzliches über Temperaturerfassung	194
3.1.1	Temperaturabhängige Effekte	194
3.1.2	Temperaturabhängige Widerstände	196
3.1.3	NTC-Widerstände oder Heißeleiter	198
3.1.4	Daten, Bauformen und Technologie von Heißeleitern	200
3.1.5	Linearisierung von Heißeleiter-Kennlinien	202
3.1.6	Verstärkerschaltungen für linearisierte Heißeleiter	203
3.1.7	PTC-Widerstände	204
3.1.8	Schutzschaltungen mit Kaltleitern	206
3.1.9	Temperaturschalter von -10°C bis $+100^{\circ}\text{C}$	207
3.1.10	Temperaturschalter mit Fühlerüberwachung	210
3.2	LED-Thermometer	215
3.2.1	Integrierter Wandlerbaustein ICL7106 und ICL7107	216
3.2.2	Externe Komponenten des ICL7106 und ICL7107	220
3.2.3	Integrierende AD-Wandler mit dem ICL7106 und ICL7107	224
3.3	Thermoelemente	227
3.3.1	Thermoelektrischer Effekt	228
3.3.2	Messungen mit Thermoelementen	229
3.3.3	Verstärker für Thermoelemente	231
3.4	Widerstandsthermometer mit Pt100 bzw. Ni100	233
3.4.1	Pt100-Widerstandsthermometer	233
3.4.2	Ni100-Widerstandsthermometer	235
3.4.3	Silizium-Temperatursensor als Pt100-Ersatz	236
3.4.4	Anschluss eines Widerstandsthermometers	237
3.4.5	Vermeidung elektromagnetischer Störanfälligkeit	239

3.4.6	Erdschleifen, Erdung und abgeschirmte Leitungen	243
3.4.7	Wärmeflussaufnehmer	245
3.5	Messung mechanischer Größen mit Temperatursensoren	246
3.5.1	Füllstandsmessung	246
3.5.2	Messung der Strömungsgeschwindigkeit	247
3.5.3	Mikrobrücken-Luftstromsensoren	250
3.5.4	Heißfilm-Luftmassensensor	253
3.5.5	Hitzdraht-Luftmassensensor	255
4	Optische Sensoren	257
4.1	Eigenschaften und Ausführungsformen	258
4.1.1	Hellempfindlichkeit	258
4.1.2	Technologie der Photodioden	261
4.1.3	Anwendungen von Photodioden	262
4.1.4	Photowiderstand	263
4.1.5	Messschaltung mit einem Photowiderstand	265
4.1.6	Dämmerungsschalter	266
4.1.7	Phototransistor	268
4.1.8	Automatische Garagenbeleuchtung mit Phototransistor	269
4.1.9	Photoelement	270
4.2	Aktive Optoelektronik	273
4.2.1	Emitterbauelemente	274
4.2.2	Laserdioden (Halbleiter-Laser)	274
4.2.3	Leuchtdioden	279
4.3	Optokoppler	282
4.4	Lichtschraken und optoelektronische Abtastsysteme	284
4.4.1	Einweglichtschraken	284
4.4.2	Sonderformen von Einweglichtschraken	286
4.4.3	Reflexionslichtschraken	286
4.4.4	Reflexionslichttaster	287
4.4.5	Erfassung glänzender Objekte	289
4.4.6	Lichttaster mit Hintergrundausblendung	290
4.4.7	Bohrerbruchkontrolle mittels Lichtschrake	292
4.4.8	Optische Entfernungsmessung	293
4.5	Optische Drehwinkel- und Positionserfassung	297
4.5.1	Absolut-Drehwinkelgeber	298
4.5.2	Gabellichtschraken	300
4.5.3	Inkrementale Drehgeber	303
4.5.4	Signalauswertung	304

5	Feuchtesensoren	307
5.1	Physikalische Messverfahren	307
5.1.1	Zweckmäßige Messmethoden	308
5.1.2	Methoden der Feuchtegehaltsbestimmung	309
5.1.3	Indirekte Messverfahren	311
5.1.4	Labormessverfahren höherer Genauigkeit	313
5.2	Physikalische Zusammenhänge	316
5.2.1	Definition des Wasserdampf-Partialdrucks	316
5.2.2	Taupunkt	317
5.2.3	Relative Feuchte in Gasen	319
5.2.4	Relative Feuchte in Flüssigkeiten	320
5.2.5	Aufbau und Funktionsweise eines Aluminiumoxid-Feuchtesensors	321
5.2.6	Anwendung von Aluminiumoxid-Feuchtesensoren	322
5.2.7	Temperatur- und Druckverhalten	326
5.3	Realisierung von Feuchtemessung	327
5.3.1	Einfache Messschaltung mit Feuchtesensor	328
5.3.2	Feuchteabhängige Steuerung	333
	Sachverzeichnis	337