
Messelektronik und Sensoren

Herbert Bernstein

Messelektronik und Sensoren

Grundlagen der Messtechnik, Sensoren,
analoge und digitale Signalverarbeitung

2. Auflage

Herbert Bernstein
München, Deutschland

ISBN 978-3-658-38928-4 ISBN 978-3-658-38929-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-38929-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2014, 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Reinhard Dapper

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Eine rationelle Betriebsführung in prozesstechnischen Anlagen ist ohne eine moderne Messtechnik nicht mehr denkbar. Voraussetzung für den Einsatz von Steuereinrichtungen, Reglern, Prozessrechnern und PC-Systemen ist eine kontinuierliche oder quasi-kontinuierliche sowie exakte Messwerterfassung und die Darstellung der Messwerte in Form elektrischer, hydraulischer oder pneumatischer Signale.

Die messtechnische Erfassung und Auswertung der Umwelt ist für den Ingenieur und Physiker von jeher die Voraussetzung für seine Arbeit gewesen. Die heute anstehenden naturwissenschaftlichen und technischen Aufgaben stellen ihn vor eine sehr große Anzahl von miteinander verknüpften Problemen. Deren Lösung bedarf einer ganzheitlichen Betrachtung, wozu die Methoden der Sensorik und der Messwerterfassung und -verarbeitung einen wichtigen Beitrag leisten können. Für den Techniker und Meister im Labor, im Betrieb und in der Anlagentechnik ist die praktische Anwendung der zahlreichen Sensoren und die Kenntnis der Messelektronik bzw. PC-Messtechnik heute unentbehrlich.

Das Buch gibt einen Einblick in die heutige Betriebsmesstechnik einschließlich der Analysentechnik, ohne dabei Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Für den Studierenden stellt das Buch neben den einschlägigen Lehr- und Handbüchern eine Einführung dar. Dem im Beruf stehenden Ingenieur vermittelt es einen raschen Überblick über ihm nicht vertraute Messverfahren und Geräte.

In der Messtechnik ist ein PC-System heute zum unersetzlichen Hilfsmittel geworden. Der PC führt automatisch Messungen aus, analysiert Messdaten und stellt sie als Grafik oder Datei zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Der PC kann ganze Anlagen steuern, indem er mit Relais, Ventile und Motoren geschaltet werden kann. Natürlich ist er auch aus der Regelungstechnik nicht mehr wegzudenken. Musste früher eine Regelungsschaltung durch zahlreiche diskrete Bauelemente oder mit sehr teuren Prozessrechnern aufgebaut werden, lässt sie sich heute durch die Verwendung eines PC-Systems flexibler und effektiver gestalten, weil Hardware-Komponenten durch eine entsprechende Software ersetzt werden können.

Durch die notwendige Kombination der analogen und der digitalen Schaltungstechnik ergeben sich oft Problemstellungen, die sich nur durch entsprechende Erfahrung

auf beiden Gebieten lösen lassen. Aus diesem Grunde werden in diesem Buch nicht nur die Bauelemente der Messtechnik transparent gestaltet, sondern auch die analogen Komponenten, die für den Aufbau von Mess-, Steuer- und Regelungssystemen notwendig sind, ausführlich dargestellt.

Die Erfahrungen und Vorkenntnisse der PC-Benutzer oder derjenigen, die es werden wollen, sind ganz unterschiedlicher Natur. Auf der einen Seite gibt es die „PC-Freaks“, die über einen hohen Kenntnisstand betreffs Programmierung und Innenleben des PC verfügen, aber mit der Analogtechnik nicht so vertraut sind, dass sie entsprechende Systeme entwickeln könnten. Auf der anderen Seite wird der PC in den unterschiedlichsten Bereichen, sei es in der Elektrotechnik/Elektronik, im Maschinenbau oder in der Verfahrenstechnik, eingesetzt. Hier wird das PC-System eher als Hilfsmittel zur eigentlichen Problemlösung betrachtet und dementsprechend sind die PC-Kenntnisse meist nicht tiefgreifend genug, um Messsysteme hinsichtlich ihrer Eignung für den PC beurteilen oder selbst entwickeln zu können.

Den theoretischen Grundlagen und den Messverfahren ist ebenso breiter Raum gewidmet wie der Beschreibung von Systemen bzw. Geräten und Messeinrichtungen. Durch Angabe von Messbereichen und Fehlergrenzen werden zusätzliche Anhaltspunkte für den Einsatz gegeben, wobei die genannten Werte aufgrund der ständig technischen Entwicklung als Mindestwerte anzusehen sind. Zahlreiche Tabellen runden das Buch zu einer handlichen Arbeitsunterlage ab.

Meiner Frau Brigitte danke ich für die Erstellung der Zeichnungen und für die Korrektur des Manuskripts.

Zur 2. Auflage: Das Fachbuch wurde überarbeitet und erweitert.

München
im Sommer 2022

Herbert Bernstein
E-Mail: Bernstein-Herbert@t-online.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung in die Sensorik und in die elektronische Messtechnik	1
1.1 Sensortypen	2
1.1.1 Standardsensoren	6
1.1.2 Messtechnische Grundbegriffe	8
1.1.3 Analoge und digitale Messgeräte	11
1.1.4 Strom und Spannung	20
1.1.5 Widerstände	25
1.2 Kalibrieren von Mess- und Prüfmitteln	27
1.3 Analoge und digitale Messwerterfassung	28
1.3.1 Aufbau einer analogen Messkette	28
1.3.2 Aufbau einer digitalen Messkette	29
1.3.3 Erfassung und Verarbeitung von Messdaten	31
1.3.4 Steuern, Regeln und Visualisieren	35
1.4 Messfehler	41
1.4.1 Fehlerarten	42
1.4.2 Fehlerquellen	50
1.4.3 Einflussfehler	52
1.4.4 Fehlerfortpflanzung	57
1.4.5 Auswahlkriterien für Messeinrichtungen	61
2 Bauelemente der elektronischen Messwerterfassung	65
2.1 Analoge Verstärkerfamilien	68
2.1.1 Interner Schaltungsaufbau von Operationsverstärkern	70
2.1.2 Betriebsarten eines Operationsverstärkers	72
2.1.3 Übertragungscharakteristik bei Operationsverstärkern	74
2.1.4 Invertierende Betriebsart	76
2.1.5 Nicht invertierender Betrieb	78
2.1.6 Spannungsabhängige Stromgegenkopplung	81
2.1.7 Stromabhängige Spannungsgegenkopplung	82
2.1.8 Stromabhängige Stromgegenkopplung	83

2.2	Lineare und nicht lineare Verstärkerschaltungen	83
2.2.1	Addierer bzw. Summierer	84
2.2.2	Operationsverstärker als Integrator	85
2.2.3	Differenzierer mit Operationsverstärker	87
2.2.4	Differenzverstärker oder Subtrahierer	88
2.2.5	Instrumentenverstärker	91
2.2.6	Spannungs- und Strommessung	93
2.3	Komparator und Schmitt-Trigger	94
2.3.1	Einfacher Spannungsvergleich	95
2.3.2	Spannungsvergleich im gesättigten Verstärkerbetrieb	96
2.3.3	Window-Komparator	100
2.3.4	Dreipunktkomparator	102
2.3.5	Schmitt-Trigger	104
2.3.6	Schmitt-Trigger in nicht gesättigter Betriebsart	107
2.3.7	Komparator mit Kippverhalten	111
2.4	Messbrücken	112
2.4.1	Unbelasteter Spannungsteiler	113
2.4.2	Belasteter Spannungsteiler	114
2.4.3	Brückenschaltung	114
2.4.4	Einfache Kapazitätsmessbrücke	116
2.4.5	Wien- und Wien-Robinson-Brücke	120
2.4.6	Maxwell-Brücke	120
2.4.7	Schering-Brücke	122
2.4.8	Maxwell-Wien-Brücke	123
2.4.9	Frequenzunabhängige Maxwell-Brücke	125
2.5	Analogschalter	126
2.5.1	Schalterfunktionen der Analogschalter	129
2.5.2	Operationsverstärker mit digitaler Ansteuerung	133
2.5.3	Sample & Hold-Schaltungen	135
2.6	Analog-Digital- und Digital-Analog-Wandler	141
2.6.1	Aufbau eines Datenerfassungssystems	141
2.6.2	Messdatenerfassung ohne Abtast- und Halteeinheit	145
2.6.3	Zeitmultiplexe Messdatenerfassung mit Abtast- und Halteeinheit	146
2.6.4	Simultane Messdatenerfassung mit Abtast- und Halteeinheit	149
2.6.5	Antialiasing-Filter	150
2.6.6	Systeme zur Signalabtastung	151
2.6.7	Theorem zur Signalabtastung	154
2.7	AD- und DA-Wandler	156
2.7.1	Natürlicher Binärcode	157
2.7.2	Komplementärer Binärcode	159
2.7.3	Codes für AD- und DA-Wandler	159

2.7.4	BCD-Codierung	161
2.7.5	Spezifikationen von Datenumsetzern	162
2.7.6	Relative Genauigkeit bei Wandler-Systemen	166
2.7.7	Absolute Genauigkeit bei Wandlern	168
2.8	Digital-Analog-Wandler	172
2.8.1	Übertragungsfunktion	172
2.8.2	Aufbau und Funktion eines DA-Wandlers	176
2.8.3	R2R-DA-Wandler	179
2.8.4	DA-Wandler mit externen Widerständen	180
2.9	Analog-Digital-Wandler	183
2.9.1	AD-Wandler nach dem Zählverfahren	184
2.9.2	AD-Wandler mit Nachlaufsteuerung	186
2.9.3	AD-Wandler mit stufenweiser Annäherung	187
2.9.4	Single-Slope-AD-Wandler	191
2.9.5	Dual-Slope-AD-Wandler	192
2.9.6	Spannungs-Frequenz-Wandler	194
3	Temperatursensoren	199
3.1	Grundsätzliches über Temperaturerfassung	200
3.1.1	Temperaturabhängige Effekte	201
3.1.2	Temperaturabhängige Widerstände	202
3.1.3	NTC-Widerstände oder Heißeleiter	204
3.1.4	Daten, Bauformen und Technologie von Heißeleitern	206
3.1.5	Linearisierung von Heißeleiter-Kennlinien	208
3.1.6	Verstärkerschaltungen für linearisierte Heißeleiter	209
3.1.7	PTC-Widerstände	211
3.1.8	Schutzschaltungen mit Kaltleitern	212
3.1.9	Temperaturschalter von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$	213
3.1.10	Temperaturschalter mit Fühlerüberwachung	216
3.2	LED-Thermometer	221
3.2.1	Integrierter Wandlerbaustein ICL7106 und ICL7107	222
3.2.2	Externe Komponenten des ICL7106 und ICL7107	227
3.2.3	Integrierende AD-Wandler mit dem ICL7106 und ICL7107	231
3.3	Thermoelemente	235
3.3.1	Thermoelektrischer Effekt	235
3.3.2	Messungen mit Thermoelementen	237
3.3.3	Verstärker für Thermoelemente	238
3.4	Widerstandsthermometer mit Pt100 bzw. Ni100	241
3.4.1	Pt100-Widerstandsthermometer	241
3.4.2	Ni100-Widerstandsthermometer	243
3.4.3	Silizium-Temperatursensor als Pt100-Ersatz	244
3.4.4	Anschluss eines Widerstandsthermometers	245

3.4.5	Vermeidung elektromagnetischer Störanfälligkeit	247
3.4.6	Erdschleifen, Erdung und abgeschirmte Leitungen	251
3.4.7	Wärmeflussaufnehmer	252
3.5	Messung mechanischer Größen mit Temperatursensoren	254
3.5.1	Füllstandsmessung	255
3.5.2	Messung der Strömungsgeschwindigkeit	256
3.5.3	Mikrobrücken-Luftstromsensoren	259
3.5.4	Heißfilm-Luftmassensensor	262
3.5.5	Hitzdraht-Luftmassensensor	263
4	Optische Sensoren	267
4.1	Eigenschaften und Ausführungsformen	269
4.1.1	Hellempfindlichkeit	269
4.1.2	Technologie der Photodioden	271
4.1.3	Anwendungen von Photodioden	272
4.1.4	Photowiderstand	274
4.1.5	Messschaltung mit einem Photowiderstand	276
4.1.6	Dämmerungsschalter	277
4.1.7	Phototransistor	279
4.1.8	Automatische Garagenbeleuchtung mit Phototransistor	280
4.1.9	Photoelement	281
4.2	Aktive Optoelektronik	284
4.2.1	Emitterbauelemente	285
4.2.2	Laserdioden (Halbleiter-Laser)	285
4.2.3	Leuchtdioden	290
4.3	Optokoppler	293
4.4	Lichtschranken und optoelektronische Abtastsysteme	295
4.4.1	Einweglichtschranken	296
4.4.2	Sonderformen von Einweglichtschranken	297
4.4.3	Reflexionslichtschranken	297
4.4.4	Reflexionslichttaster	298
4.4.5	Erfassung glänzender Objekte	301
4.4.6	Lichttaster mit Hintergrundausbildung	302
4.4.7	Bohrerbruchkontrolle mittels Lichtschranke	303
4.4.8	Optische Entfernungsmessung	305
4.5	Optische Drehwinkel- und Positionserfassung	309
4.5.1	Absolut-Drehwinkelgeber	309
4.5.2	Gabellichtschranken	311
4.5.3	Inkrementale Drehgeber	315
4.5.4	Signalauswertung	316

5	Feuchtesensoren	319
5.1	Physikalische Messverfahren	320
5.1.1	Zweckmäßige Messmethoden	321
5.1.2	Methoden der Feuchtegehaltsbestimmung	322
5.1.3	Indirekte Messverfahren	324
5.1.4	Labormessverfahren höherer Genauigkeit	325
5.2	Physikalische Zusammenhänge	328
5.2.1	Definition des Wasserdampf-Partialdrucks	329
5.2.2	Taupunkt	330
5.2.3	Relative Feuchte in Gasen	330
5.2.4	Relative Feuchte in Flüssigkeiten	331
5.2.5	Aufbau und Funktionsweise eines Aluminiumoxid- Feuchtesensors	333
5.2.6	Anwendung von Aluminiumoxid-Feuchtesensoren	336
5.2.7	Temperatur- und Druckverhalten	339
5.3	Realisierung von Feuchtemessung	340
5.3.1	Einfache Messschaltung mit Feuchtesensor	340
5.3.2	Feuchteabhängige Steuerung	345
6	USB-Oszilloskop	349
6.1	Messungen mit USB-Oszilloskop	351
6.1.1	Aufzeichnungsarten	352
6.1.2	USB-Oszilloskop-Fenster	355
6.1.3	MSO-Ansicht für Mixed-Signal-Oszilloskop	356
6.1.4	Triggermarkierung	360
6.1.5	Spektralansicht	361
6.1.6	Persistenzmodus	362
6.1.7	Messtabelle	364
6.1.8	Signallineale	365
6.1.9	Möglichkeiten der Eigenschaften des USB-Oszilloskops	370
6.1.10	Rechenkanäle	373
6.1.11	Referenzwellenformen in ausgewählter Oszilloskop- oder Spektralansicht	373
6.1.12	Maskengrenzprüfung	375
6.1.13	Alarmer	376
6.2	Menüs für USB-Oszilloskop	379
6.2.1	Menü „Datei“	379
6.2.2	Dialogfeld „Speichern unter“	380
6.2.3	Menü „Starteinstellungen“	385
6.2.4	Dialogfeld „Benutzerdefiniertes Rasterlayout“	389
6.2.5	Menü „Messungen“	390
	Stichwortverzeichnis	393