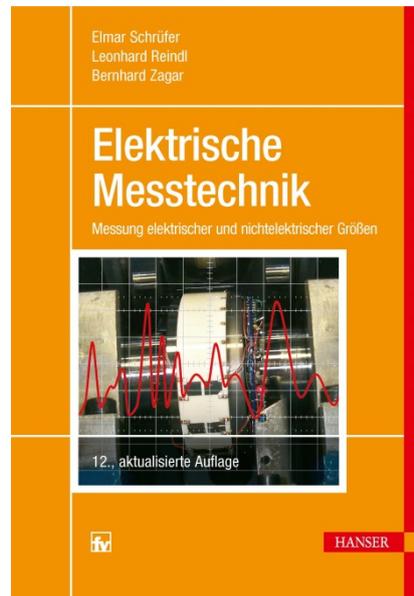


HANSER



Leseprobe

zu

Elektrische Messtechnik

Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen

12., aktualisierte Auflage

Mit 364 Bildern, 44 Tabellen und 34 Beispielen

von Elmar Schrüfer,
Leonhard Reindl, Bernhard Zagar

ISBN (Buch): 978-3-446-45654-9

ISBN (E-Book): 978-3-446-45698-3

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45654-9>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur 12. Auflage

In der Neubearbeitung für die 12. Auflage wurden neben einige Korrekturen und Präzisierungen auch neue Inhalte aufgenommen wie zum Beispiel im Kapitel Messverstärker die Ableitung der Kennlinie einer Differenzeingangsstufe eines Operationsverstärkers oder die Darlegung der Kalibrierung bei einem Wechselstrom-Gleichstrom-Komparator. Die von der Generalkonferenz und des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht vorgegebene Schreibweise der Einheiten, nach der bei der Angabe von Einheiten nur ein SI-Vorsatz für die Bildung von dezimalen Vielfachen verwendet werden soll, wurde durchgehend berücksichtigt, auch wenn dadurch an manchen Stellen die bei ungekürzter Schreibweise oft ersichtliche Information wegfällt (Beispiel Beweglichkeit von Ladungsträgern in m^2/Vs vs. $(\text{m/s})/(\text{V/m})$, also Geschwindigkeit bezogen auf die vorherrschende Feldstärke).

Die Autoren bedanken sich ferner bei den Studierenden für die zahlreichen Rückmeldungen zum Inhalt und für Hinweise auf typografische wie auch sonstige Fehler, die in der Neuauflage gerne berücksichtigt wurden.

Die Autoren würden sich freuen, wenn auch die aktualisierte 12. Auflage freundlich aufgenommen werden würde.

Hingewiesen sei neben der Hanser-Fachbuch-Homepage noch auf die folgenden Webseiten mit weiteren Informationen und Übungsaufgaben zur Elektrischen Messtechnik:

*www.schruefer-messtechnik.de
www.jku.at/emt*

Die Herstellung des Buches lag auf Seiten des Carl Hanser Verlags in den bewährten Händen von Frau Franziska Kaufmann und Herrn Manuel Leppert. Die Autoren sind ihnen zu großem Dank verpflichtet.

München, Freiburg, Linz, Mai 2018 Elmar Schrüfer Leonhard M. Reindl Bernhard Zagar

Vorwort zur 11. Auflage

In der Neubearbeitung für die 11. Auflage wurde versucht, das Buch einerseits etwas knapper und andererseits doch auch aktueller zu gestalten. So werden z. B. im Kapitel 1 bei den Messunsicherheiten zunehmend die Begriffe des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ angewendet. Ergänzt wurden des Weiteren der Abschnitt über Induktions-Durchflussmesser, Teile des Kapitels zu optischen Aufnehmern, der Abschnitt über Mikrokanalplatten zur Restlichtverstärkung sowie eine eingehendere Diskussion der Fehler von Abtast- und Haltegliedern im Kapitel 6. Das Kapitel über Rechnergestützte Messsysteme wurde um ein anschauliches Beispiel für MATLAB erweitert. Eine Spektralanalyse wird durchgeführt, um MATLAB als nützliches Werkzeug für die Auswertung von Signalen im Frequenzbereich darzustellen.

Die Autoren würden sich freuen, wenn auch die aktualisierte 11. Auflage freundlich aufgenommen werden würde.

Hingewiesen sei noch auf die Web-Seiten mit weiteren Informationen und Übungsaufgaben zur Elektrischen Messtechnik:

www.schruefer-messtechnik.de

www.jku.at/emt/content

Die Herstellung des Buches lag auf Seiten des Carl Hanser Verlags in den bewährten Händen von Frau Franziska Jacob und Frau Franziska Kaufmann. Die Autoren sind ihnen zu großem Dank verpflichtet.

München, August 2014

Elmar Schrüfer Leonhard M. Reindl Bernhard Zagar

Inhalt

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Grundlagen | 15 |
| 1.1 | Umfang und Bedeutung der elektrischen Messtechnik | 15 |
| 1.2 | Naturkonstanten und Maßeinheiten | 17 |
| 1.2.1 | Naturkonstanten | 17 |
| 1.2.2 | Internationales Einheitensystem, SI-Einheiten | 18 |
| 1.2.3 | Definition und Darstellung der Sekunde | 20 |
| 1.2.4 | Definition und Darstellung des Meters | 22 |
| 1.2.5 | Definition und Darstellung des Kilogramms | 22 |
| 1.2.6 | Definition und Darstellung der elektrischen Einheiten | 24 |
| 1.2.7 | Die SI-Einheiten der Temperatur, der Stoffmenge und der Lichtstärke | 28 |
| 1.2.8 | Größen- und Zahlenwertgleichungen | 28 |
| 1.3 | Statisches Verhalten der Messgeräte; Kennlinie und Empfindlichkeit | 29 |
| 1.4 | Messfehler und Messunsicherheiten | 31 |
| 1.4.1 | Bekannte Einflüsse; Korrektur des bekannten Messfehlers | 32 |
| 1.4.2 | Unbekannte, normalverteilte Unsicherheiten; eine einzige Messgröße X | 34 |
| 1.4.3 | Unbekannte, normalverteilte Unsicherheiten; verknüpfte Messgrößen $Y = f(X_i)$ | 38 |
| 1.4.4 | Student'sche t -Verteilung | 41 |
| 1.4.5 | Unbekannte, systematische Unsicherheiten | 42 |
| 1.4.6 | Korrelierte Messgrößen | 43 |
| 1.4.7 | Zusammenfassung | 46 |
| 1.5 | Dynamisches Verhalten der Messgeräte | 48 |
| 1.5.1 | Verzögerungsglied 1. Ordnung | 49 |
| 1.5.2 | Verzögerungsglied 2. Ordnung | 56 |
| 1.5.3 | Weitere Beispiele für das Zeitverhalten | 63 |
| 1.6 | Dynamische Messfehler | 65 |
| 1.6.1 | Fehlermöglichkeiten | 65 |
| 1.6.2 | Korrektur des dynamischen Fehlers | 67 |
| 1.7 | Strukturen von Messeinrichtungen | 69 |
| 1.7.1 | Kettenstruktur | 69 |
| 1.7.2 | Parallelstruktur | 70 |
| 1.7.3 | Kreisstruktur | 72 |
| 1.8 | Die informationstragenden Parameter der Messsignale | 73 |
| 1.9 | Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen | 76 |
| 1.9.1 | Physikalische Effekte zum elektrischen Messen nichtelektrischer Größen | 76 |
| 1.9.2 | Sensornahe Signalverarbeitung | 77 |

Messung von Strom und Spannung;

| | | |
|-------|---|-----------|
| | spannungs- und stromliefernde Aufnehmer | 79 |
| 2.1 | Elektromechanische Messgeräte und ihre Anwendung | 79 |
| 2.1.1 | Messwerke | 79 |
| 2.1.2 | Messung von Gleichstrom und Gleichspannung | 82 |
| 2.1.3 | Messung von Wechselstrom und Wechselspannung | 88 |
| 2.1.4 | Messung der Leistung | 93 |
| 2.1.5 | Messung der elektrischen Arbeit | 98 |
| 2.2 | Elektronenstrahl-Oszilloskop | 99 |
| 2.2.1 | Elektronenstrahl-Röhre | 99 |
| 2.2.2 | Baugruppen | 101 |
| 2.2.3 | Betriebsarten des Elektronenstrahl-Oszilloskops | 106 |
| 2.3 | Messverstärker | 107 |
| 2.3.1 | Einführung | 107 |
| 2.3.2 | Nicht invertierender Spannungsverstärker | 114 |
| 2.3.3 | Invertierender Stromverstärker | 120 |
| 2.3.4 | Anwendungen des Spannungsverstärkers | 125 |
| 2.3.5 | Anwendungen des Stromverstärkers | 127 |
| 2.3.6 | Nullpunktfehler des realen Operationsverstärkers | 132 |
| 2.4 | Elektrodynamische spannungsliefernde Aufnehmer | 137 |
| 2.4.1 | Weg- und Winkelmessung | 138 |
| 2.4.2 | Drehzahlaufnehmer | 139 |
| 2.4.3 | Hall-Sonde | 140 |
| 2.4.4 | Induktions-Durchflussmesser | 144 |
| 2.5 | Thermische spannungsliefernde Aufnehmer | 146 |
| 2.5.1 | Thermoelement | 146 |
| 2.5.2 | Integrierter Sperrschicht-Temperatur-Sensor | 153 |
| 2.6 | Chemische spannungsliefernde Aufnehmer und Sensoren | 154 |
| 2.6.1 | Galvanisches Element | 154 |
| 2.6.2 | pH-Messkette mit Glaselektrode | 155 |
| 2.6.3 | Sauerstoffmessung mit Festkörper-Ionenleiter | 157 |
| 2.7 | Piezo- und pyroelektrische ladungsliefernde Aufnehmer | 159 |
| 2.7.1 | Wirkungsweise und Werkstoffe | 159 |
| 2.7.2 | Piezoelektrischer Kraftaufnehmer | 162 |
| 2.7.3 | Pyroelektrischer Infrarot-Sensor | 165 |
| 2.8 | Optische Aufnehmer und Sensoren | 167 |
| 2.8.1 | Fotoelement und Fotodiode | 169 |
| 2.8.2 | Fotosensoren für Positionsmessungen und zur Bilderzeugung ... | 172 |
| 2.8.3 | Fotozelle | 173 |
| 2.8.4 | Fotovervielfacher und Mikrokanalplatte | 174 |
| 2.9 | Aufnehmer für ionisierende Strahlung | 175 |
| 2.9.1 | Ionisationskammer | 175 |
| 2.9.2 | Halbleiter-Strahlungsdetektor | 178 |

3 Messung von ohmschen Widerständen;

| | |
|---|------------|
| Widerstandsaufnehmer | 180 |
| 3.1 Strom- und Spannungsmessung | 180 |
| 3.1.1 Gleichzeitige Messung von Spannung und Strom | 180 |
| 3.1.2 Vergleich mit einem Referenzwiderstand | 181 |
| 3.2 Anwendung einer Konstantstromquelle | 182 |
| 3.3 Brückenschaltungen | 184 |
| 3.3.1 Abgleich-Widerstandsmessbrücke | 184 |
| 3.3.2 Ausschlag-Widerstandsmessbrücke | 186 |
| 3.4 Verstärker für Brückenschaltungen | 191 |
| 3.4.1 Subtrahierer mit invertierendem Verstärker | 191 |
| 3.4.2 Subtrahierer mit Elektrometer-Verstärkern | 192 |
| 3.4.3 Trägerfrequenz-Brücke und -Messverstärker | 195 |
| 3.5 Widerstandsaufnehmer zur Längen- und Winkelmessung | 198 |
| 3.6 Widerstandstemperaturfühler | 199 |
| 3.6.1 Metall-Widerstandsthermometer | 199 |
| 3.6.2 Heißeleiter | 203 |
| 3.6.3 Kaltleiter | 205 |
| 3.6.4 Silizium-Widerstandstemperatursensor | 207 |
| 3.6.5 Fehlermöglichkeiten bei der Anwendung von elektrischen Berührungsthermometern | 208 |
| 3.7 Ermittlung verfahrenstechnischer Größen durch Temperaturmessungen | 209 |
| 3.7.1 Füllstandswächter | 209 |
| 3.7.2 Thermischer Massenstrommesser | 210 |
| 3.7.3 Messung der Luftfeuchte; Messung von Gaskonzentrationen | 213 |
| 3.8 Gassensoren mit halbleitenden Metalloxiden | 214 |
| 3.9 Lichtempfindlicher Widerstand | 215 |
| 3.10 Magnetisch steuerbarer Widerstand | 216 |
| 3.10.1 Feldplatte | 216 |
| 3.10.2 Anisotroper Magneto-resistiver Effekt (AMR) | 217 |
| 3.10.3 Spinventil, Riesenmagnetowiderstand und Kolossaler Magnetowiderstand | 218 |
| 3.11 Dehnungsmessstreifen | 218 |
| 3.11.1 Prinzip | 218 |
| 3.11.2 Metall-Dehnungsmessstreifen | 219 |
| 3.11.3 Störgrößen | 221 |
| 3.11.4 Anwendung der DMS zur Spannungsanalyse | 222 |
| 3.11.5 Halbleiter-Dehnungsmessstreifen | 225 |
| 3.12 Linearisieren der Widerstandsaufnehmer-Kennlinien | 226 |
| 3.12.1 Linearisieren durch einen Vor- und/oder Parallelwiderstand | 227 |
| 3.12.2 Messung der Spannungsdifferenz bei Differenzial-Widerstandsaufnehmern | 229 |
| 3.12.3 Differenzial-Widerstandsaufnehmer in einer Halbbrücke | 230 |

4

Messung von Blind- und Scheinwiderständen;

| | |
|---|------------|
| induktive und kapazitive Aufnehmer | 231 |
| 4.1 Strom- und Spannungsmessung | 232 |
| 4.1.1 Messung der Effektivwerte | 232 |
| 4.1.2 Vergleich mit Referenzelement | 233 |
| 4.1.3 Getrennte Ermittlung des Blind- und Wirkwiderstandes | 234 |
| 4.1.4 Messung eines Phasenwinkels | 235 |
| 4.1.5 Strommessung in einem fremderregten Schwingkreis | 237 |
| 4.2 Wechselstrom-Abgleichbrücke | 238 |
| 4.2.1 Prinzip | 238 |
| 4.2.2 Kapazität-Messbrücke nach Wien | 239 |
| 4.2.3 Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell | 240 |
| 4.2.4 Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell-Wien | 240 |
| 4.2.5 Phasenschieber-Brücke | 241 |
| 4.3 Wechselspannungs-Ausschlagbrücke | 241 |
| 4.4 Induktive Aufnehmer | 242 |
| 4.4.1 Tauchanker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung | 243 |
| 4.4.2 Queranker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung | 245 |
| 4.4.3 Kurzschlussring-Sensor | 247 |
| 4.4.4 Anwendung der induktiven Längen- und Winkelgeber | 247 |
| 4.4.5 Induktiver Schleifendetektor zur Erfassung von Fahrzeugen | 248 |
| 4.4.6 Magnetoelastische Kraftmessdose | 249 |
| 4.5 Kapazitive Aufnehmer | 250 |
| 4.5.1 Änderung des Plattenabstands | 250 |
| 4.5.2 Änderung der Plattenfläche | 251 |
| 4.5.3 Geometrische Änderung des Dielektrikums | 252 |
| 4.5.4 Änderung der Permittivitätszahl durch Feuchtigkeit oder Temperatur | 254 |
| 4.6 Einsatz der induktiven und kapazitiven Abgriffe in Differenzdruck-Messumformern | 254 |
| 4.7 Vergleich der induktiven und der kapazitiven Längenaufnehmer | 256 |
| 4.7.1 Energie des magnetischen und des elektrischen Feldes | 257 |
| 4.7.2 Größte der Brückenschaltung entnehmbare Leistung | 258 |
| 4.7.3 Steuerleistung zum Verstellen der Aufnehmer | 259 |

5

Digitale Grundschaltungen; Zeit- und Frequenzmesstechnik . 261

| | |
|---|-----|
| 5.1 Darstellung, Anzeige und Ausgabe numerischer Messwerte | 261 |
| 5.1.1 Duales Zahlensystem | 261 |
| 5.1.2 Binärcodes für Dezimalzahlen | 262 |
| 5.1.3 Ziffernanzeige; Vergleich mit Skalenanzeige | 264 |
| 5.1.4 Umsetzung eines digitalen Signals in eine Spannung; Digital/Analog-Umsetzer; digital steuerbare Spannungsquelle | 264 |
| 5.2 Bistabile Kippstufen | 266 |
| 5.2.1 Asynchrones <i>RS</i> -Speicherglied | 266 |
| 5.2.2 Taktgesteuertes <i>RS</i> -Speicherglied | 267 |
| 5.2.3 Taktflankengesteuertes <i>D</i> -Speicherglied | 268 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.2.4 | Taktflankengesteuertes <i>JK</i> -Speicherglied | 269 |
| 5.2.5 | Taktflankengesteuertes <i>T</i> -Speicherglied | 269 |
| 5.3 | Zähler | 270 |
| 5.3.1 | Synchroner Vorwärts-Dualzähler | 270 |
| 5.4 | Register | 271 |
| 5.4.1 | Parallelregister | 271 |
| 5.4.2 | Schieberegister zur Parallel/Serien-Umsetzung | 272 |
| 5.4.3 | Schieberegister zur Serien/Parallel-Umsetzung | 273 |
| 5.4.4 | Multiplexer als Parallel/Serien-Umsetzer | 274 |
| 5.5 | Digitale Zeitmessung | 275 |
| 5.5.1 | Einführung | 275 |
| 5.5.2 | Digitale Messung eines Zeitintervalls | 276 |
| 5.5.3 | Messung einer Periodendauer | 276 |
| 5.5.4 | Messung eines Phasenwinkels | 277 |
| 5.6 | Digitale Frequenzmessung | 278 |
| 5.6.1 | Digitale Messung einer Frequenz oder einer Impulsrate | 278 |
| 5.6.2 | Messung des Verhältnisses zweier Frequenzen oder Drehzahlen .. | 279 |
| 5.6.3 | Messung der Differenz zweier Frequenzen oder Drehzahlen | 279 |
| 5.6.4 | Universalzähler | 279 |
| 5.7 | Analoge Messung eines Zeitintervalls oder einer Frequenz | 281 |
| 5.7.1 | Analoge Messung eines Zeitintervalls; t/u -Umformung | 281 |
| 5.7.2 | Analoge Messung einer Frequenz oder Impulsrate; f/u -Umformung | 281 |

6 Analog/Digital-Umsetzer für elektrische und mechanische Größen

| | | |
|----------|--|------------|
| 6 | Ben | 284 |
| 6.1 | Abtast- und Halteglied | 284 |
| 6.2 | Direkt vergleichende A/D-Umsetzer | 286 |
| 6.2.1 | Komparator | 286 |
| 6.2.2 | Komparator mit Hysterese | 287 |
| 6.2.3 | A/D-Umsetzer mit parallelen Komparatoren | 288 |
| 6.2.4 | Kaskaden-Parallel-Umsetzer | 289 |
| 6.2.5 | A/D-Umsetzer mit sukzessiver Annäherung an den Messwert | 290 |
| 6.3 | Spannung/Zeit- und Spannung/Frequenz-Umsetzer | 292 |
| 6.3.1 | u/t -Zweirampen-Umsetzer | 292 |
| 6.3.2 | u/f -Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren | 294 |
| 6.3.3 | Delta-Sigma-Umsetzer | 296 |
| 6.4 | Kenngrößen der Analog/Digital-Umsetzer | 299 |
| 6.4.1 | Kennlinie | 299 |
| 6.4.2 | Abtasttheorem | 300 |
| 6.4.3 | Umsetzrate und Auflösung | 301 |
| 6.4.4 | Quantisierungsrauschen, Zahl der effektiven Bit | 302 |
| 6.5 | Analog/Digital-Umsetzer in Messgeräten | 304 |
| 6.5.1 | Digital-Multimeter | 304 |
| 6.5.2 | Digitales Speicher-Oszilloskop | 305 |
| 6.6 | A/D-Umsetzer für mechanische Größen | 308 |
| 6.6.1 | Endlagenschalter | 308 |
| 6.6.2 | Codierte Längen- und Winkelgeber | 309 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.6.3 | Inkrementale Längen- und Winkelgeber | 310 |
| 6.6.4 | Vergleich der codierten und inkrementalen Längengeber | 314 |

7 Schwingungsmessungen

| | | |
|-------|--|-----|
| 7.1 | Astabile Kippschaltungen als Frequenzumsetzer | 315 |
| 7.1.1 | Kippschaltung mit Verstärker und Komparator | 315 |
| 7.1.2 | Kippschaltung mit stabilisierten Hilfsspannungen | 318 |
| 7.2 | Harmonische Oszillatoren | 320 |
| 7.2.1 | Erzeugung ungedämpfter Schwingungen, Prinzip | 320 |
| 7.2.2 | LC-Oszillator | 321 |
| 7.2.3 | RC-Oszillator | 324 |
| 7.3 | Piezoelektrische Resonatoren | 326 |
| 7.3.1 | Volumenschwingende Quarze | 326 |
| 7.3.2 | Oberflächenwellen OFW in Quarzen | 333 |
| 7.3.3 | Funkabfragbare Sensoren | 336 |
| 7.3.4 | Ultraschall-Durchflussmesser | 338 |
| 7.4 | Mechanische Schwingungen | 341 |
| 7.4.1 | Charakteristische Größen | 341 |
| 7.4.2 | Relative Schwingungsmessung | 342 |
| 7.4.3 | Absolute Schwingungsmessung | 345 |
| 7.4.4 | Monolithisch integrierter Beschleunigungssensor | 347 |
| 7.4.5 | Stimmgabel-Frequenzumsetzer | 348 |
| 7.4.6 | Coriolis-Massendurchflussmesser | 349 |

8 Spektralanalyse

| | | |
|-------|---|-----|
| 8.1 | Aufgabenstellung | 352 |
| 8.2 | FTC eines zeitkontinuierlichen Signals | 352 |
| 8.3 | FTD eines zeitdiskreten Signals | 353 |
| 8.3.1 | Übergang vom zeitkontinuierlichen zum zeitdiskreten Signal | 353 |
| 8.3.2 | Unterschiede bei der Transformation eines zeitkontinuierlichen und eines zeitdiskreten Signals | 354 |
| 8.3.3 | Abtasttheorem | 355 |
| 8.4 | DFT eines abgetasteten, zeitbegrenzten Signals | 356 |
| 8.4.1 | Datensatz mit endlich vielen Werten; diskrete Spektralfunktion .. | 356 |
| 8.4.2 | Zusammenhang zwischen FTD und DFT; Anhängen von Nullen .. | 360 |
| 8.4.3 | Wahl der Abtastfrequenz | 363 |
| 8.4.4 | Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT | 364 |
| 8.5 | DFT eines abgetasteten, nicht zeitbegrenzten Signals | 366 |
| 8.5.1 | Konstantes Signal | 366 |
| 8.5.2 | Periodisches Signal | 369 |
| 8.5.3 | Anhängen von Nullen, Abtastfrequenz und Messzeit | 374 |
| 8.5.4 | Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT | 374 |
| 8.6 | Fensterfunktionen | 376 |
| 8.6.1 | Kriterien zur Beurteilung | 376 |
| 8.6.2 | Fensterfunktionen und ihre Spektren | 377 |
| 8.6.3 | Fensterung bei transienten Signalen | 384 |
| 8.7 | Anwendungen der DFT | 385 |
| 8.8 | Leistungsmessung im Zeit- und Frequenzbereich | 386 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 9 | Rechnerunterstützte Messsysteme | 391 |
| 9.1 | Einführung | 391 |
| 9.2 | Aufbau eines Personal Computers | 391 |
| 9.2.1 | Gerätetechnik | 391 |
| 9.2.2 | Software | 392 |
| 9.3 | Schnittstellen und Bussysteme | 392 |
| 9.3.1 | Einführung | 392 |
| 9.3.2 | Serielle RS-232-Schnittstelle und abgeleitete Schnittstellen | 395 |
| 9.3.3 | Universal Serial Bus USB | 398 |
| 9.3.4 | Paralleler IEC-Bus (GPIB-Bus, IEEE-488-Bus) | 398 |
| 9.3.5 | Kabellose Netzwerke; Bluetooth, WLAN und IrDA | 402 |
| 9.4 | Messgeräte mit integrierter digitaler Schnittstelle | 403 |
| 9.4.1 | Anschluss | 403 |
| 9.4.2 | Steuerung | 404 |
| 9.5 | Messgeräte ohne integrierte Schnittstelle | 405 |
| 9.5.1 | Prinzip | 405 |
| 9.5.2 | Aufbau einer Messkarte | 405 |
| 9.6 | Messprogramme | 409 |
| 9.6.1 | Aufgaben der Messprogramme | 409 |
| 9.6.2 | Ablauf eines rechnergestützten Messprozesses | 410 |
| 9.6.3 | Virtuelles Messgerät | 413 |
| 9.6.4 | LabVIEW | 414 |
| 9.6.5 | MATLAB | 419 |
| 9.7 | Energieautarke, funkabfragbare verteilte Messsysteme | 424 |
| | Literatur | 431 |
| | Index | 441 |

2

Messung von Strom und Spannung; spannungs- und stromliefernde Aufnehmer

In diesem Kapitel werden zunächst die Geräte zur Strom- und Spannungsmessung vorgestellt, um dann in den Abschnitten 2.4 bis 2.9 die Effekte und die Aufnehmer zu behandeln, die nichtelektrische Größen als Strom- oder Spannungssignale darzustellen gestatten und damit elektrisch messbar machen.

■ 2.1 Elektromechanische Messgeräte und ihre Anwendung

2.1.1 Messwerke

Die nachfolgend erklärten Messgeräte nutzen die zwischen zwei magnetischen Feldern wirkende Kraft zur Messung von Strömen aus. Die Felder können in stromdurchflossenen Leitungen oder in ferromagnetischen Stoffen ihren Ursprung haben. Durch die Kombination dieser Möglichkeiten entstehen Messwerke mit speziellen Vor- und Nachteilen, die von ihrer Wirkungsweise her Strommessgeräte sind [2.1, 2.2].

Drehspulmesswerk. Das Drehspulmesswerk enthält eine in dem radialhomogenen Feld eines Dauermagneten beweglich aufgehängte Spule (Bild 2.1). Fließt durch die Spule der Strom I , so wird sie senkrecht zur Richtung des durchgehenden Stroms und senkrecht zur Richtung des Magnetfelds ausgelenkt. Ist l die Länge der Spule im Magnetfeld, d ihr Durchmesser, N ihre Windungszahl und B die Induktion des Dauermagneten, so ist die auf die Spule ausgeübte elektrische Kraft F_e

$$F_e = INBI, \quad (2.1)$$

die mit dem Hebelarm $d/2$ und der Spulenfläche $A = d \cdot l$ das elektrische Moment M_e

$$M_e = 2 \frac{d}{2} l N B I = A N B I \quad (2.2)$$

ergibt. Damit dieses Moment nicht wie bei einem Gleichstrommotor zu einer dauernden Umdrehung der Spule führt, ist diese durch eine Feder gefesselt. Die von dieser Feder mit der Federkonstanten c ausgeübte Richtkraft führt zu einem mechanischen Moment M_m , das mit dem Ausschlagwinkel α zunimmt:

$$M_m = c \alpha. \quad (2.3)$$

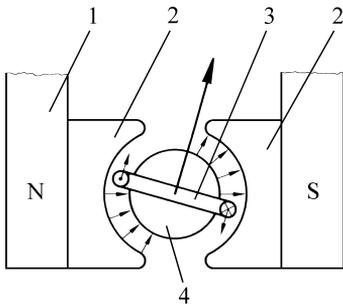


Bild 2.1 Prinzip und Aufbau eines Drehspulmesswerks
 1 Magnet, 2 Polschuhe, 3 Drehspule,
 4 Kern aus Weicheisen

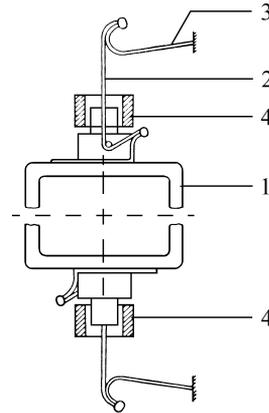


Bild 2.2 Spannbandlegerung
 1 Drehspule, 2 Spannband, 3 Spannfeder,
 4 Abfangvorrichtung [0.1]

Fließt kein Strom, so wird die Spule durch die Feder in der Nullstellung gehalten. Bei Stromdurchgang wird dann die Spule so weit ausgelenkt, bis das elektrische Moment gleich dem mechanischen ist. In diesem Fall gilt

$$ANBI = c\alpha \quad \text{und} \tag{2.4}$$

$$\alpha = \frac{ANB}{c} I = kI, \tag{2.5}$$

wenn die bekannten Größen A, N, B, c in der Konstanten k zusammengefasst werden.

Der Ausschlag nimmt also linear mit dem durchgehenden Strom zu; die Empfindlichkeit

$$E = \frac{d\alpha}{dI} = k = \frac{ANB}{c} \tag{2.6}$$

ist konstant.

Ändert sich der zu messende Strom, so bewegt sich die Spule im Magnetfeld und in ihr wird die Spannung u induziert:

$$u = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NBA \frac{d\alpha}{dt}. \tag{2.7}$$

Diese Spannung hat einen Ausgleichsstrom i zur Folge, der dem Messstrom entgegenwirkt. Dadurch wird bei richtiger Auslegung des Messwerks sein Ausschlag so weit gedämpft, dass der neue Endwert einerseits ohne Überschwingen, andererseits aber auch möglichst schnell erreicht wird.

Um die bei einer Bewegung entstehende Reibung besonders gering zu halten, wird die Drehspule nicht in Steinen gelagert, sondern an einem Spannband aufgehängt (Bild 2.2). Mit der Spule dreht sich das Band und erzeugt das benötigte mechanische Rückstellmoment. Gleichzeitig dient es dem Anschluss der Spule an den äußeren Stromkreis und löst so die drei Aufgaben Lagerung, Rückstellung und Stromzuführung.

Die Empfindlichkeit des Drehspulinstruments lässt sich vielen Erfordernissen anpassen. Ströme ab 10^{-9} A können gemessen werden. Dabei wird in der Spule nur eine geringe Leistung umgesetzt. Der Eigenverbrauch des Drehspulinstruments ist niedrig. Diese Eigenschaft

ist wichtig, da die im Messwerk verbrauchte Energie dem Messkreis entzogen wird und so die zu messende Größe unter Umständen verfälscht.

Elektrodynamisches Messwerk. Bei dem elektrodynamischen Messwerk oder Dynamometer ist der Dauermagnet des Drehspulmesswerks durch einen Elektromagneten ersetzt (Bild 2.3). Dieser kann aus einer Spule mit (eisengeschlossenes elektrodynamisches Messwerk) oder ohne Eisenkern (eisenloses elektrodynamisches Messwerk) bestehen. Wird ein Eisenkern verwendet, so ist er aus einzelnen, gegeneinander isolierten Blechen aufgebaut, um bei der Messung von Wechselströmen die Wirbelstromverluste niedrig zu halten.

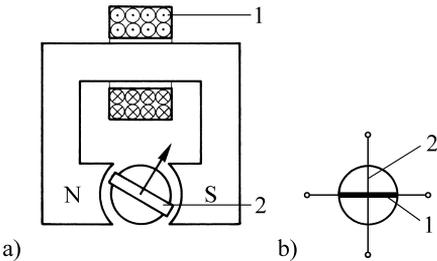


Bild 2.3 Elektrodynamisches Messwerk
 a) Prinzip: 1 fest stehende, vom Strom I_1 durchflossene Feldspule mit Eisenkern, 2 bewegliche, vom Strom I_2 durchflossene Spule
 b) Schaltbild mit 1 Strompfad und 2 Spannungspfaden

Ist der magnetische Widerstand des Eisenkreises zu vernachlässigen, und fließt der Strom I_1 durch die Spule mit N_1 Windungen, so ist die magnetische Induktion B in dem Luftspalt der Breite a

$$B = \frac{\mu_0 N_1}{a} I_1. \tag{2.8}$$

Von diesem Feld wird auf die bewegliche, von dem Strom I_2 durchflossene Spule mit N_2 Windungen und der Fläche A eine Kraft ausgeübt, woraus das elektrische Moment M_e

$$M_e = \frac{\mu_0 A N_1 N_2}{a} I_1 I_2 \tag{2.9}$$

resultiert. Das Rückstellmoment M_m wird wie bei dem Drehspulinstrument durch eine Spiralfeder oder durch ein Spannbänder erzeugt, $M_m = c \alpha$. Bei Gleichheit der Momente ist der Ausschlagwinkel α :

$$\alpha = \frac{\mu_0 A N_1 N_2}{a c} I_1 I_2 = k I_1 I_2, \tag{2.10}$$

wenn in dem Proportionalitätsfaktor k wieder die bekannten Größen zusammengefasst werden. Das elektrodynamische Messwerk ist ein multiplizierendes Instrument und zeigt das Produkt zweier Ströme an. Häufig wird es zur Leistungsmessung benutzt. Wird derselbe Strom $I = I_1 = I_2$ durch beide Spulen geschickt, so ist der Ausschlag proportional zu I^2 und die Kennlinie verläuft quadratisch.

In Abschnitt 2.1.4 wird noch gezeigt, dass bei Wechselströmen die Phasenlage zu berücksichtigen ist. Für diesen allgemeineren Fall ist die rechte Seite der Gl. (2.10) noch mit dem Kosinus des Phasenwinkels φ zu multiplizieren (Gl. (2.51)).

2.1.2 Messung von Gleichstrom und Gleichspannung

Strommessung

Im einfachsten Fall besteht ein Stromkreis aus einer Spannungsquelle mit der Leerlaufspannung U_L , dem Innenwiderstand R_i und einem Lastwiderstand R_b (Bild 2.4). Um den über den Lastwiderstand fließenden Strom zu messen, ist der Kreis aufzutrennen und das Strommessgerät mit dem Widerstand R_M ist in Reihe mit dem Lastwiderstand anzuschließen. Messgerät und Lastwiderstand werden vom gleichen Strom durchflossen, der jedoch durch das Messgerät beeinflusst ist. Ohne Messgerät fließt in dem Kreis der Strom I_b

$$I_b = \frac{U_L}{R_i + R_b} \tag{2.11}$$

und mit dem Messgerät der Strom I_M

$$I_M = \frac{U_L}{R_i + R_b + R_M} \tag{2.12}$$

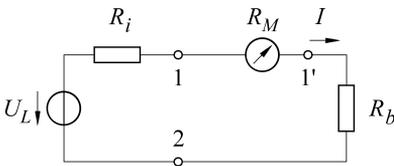


Bild 2.4 Zur Messung des über den Verbraucher R_b fließenden Stroms wird das Messgerät in Reihe zum Verbraucher angeschlossen

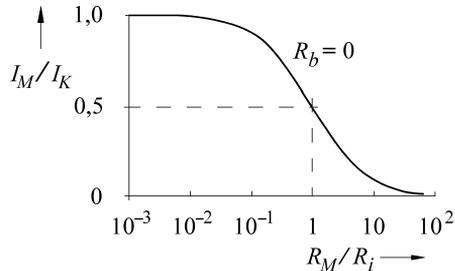


Bild 2.5 Um den Kurzschlussstrom I_K zu messen, muss der Widerstand R_M des Messgeräts klein sein gegenüber dem Innenwiderstand R_i der Quelle

Der wahre Wert I_b des Stroms wird nur dann angezeigt, wenn R_M gegenüber $R_i + R_b$ zu vernachlässigen ist. Daraus folgt für die Strommessung die Regel:

- Der Widerstand des Strommessers soll möglichst niedrig sein;
- Ströme sind niederohmig zu messen.

Ist der Kurzschlussstrom I_K der Quelle zu messen:

$$I_K = \frac{U_L}{R_i}, \tag{2.13}$$

so ist der Lastwiderstand $R_b = 0$ und die Quelle wird nur mit dem Messinstrument belastet. Dieses zeigt den Strom I_M an:

$$I_M = \frac{U_L}{R_i + R_M} \tag{2.14}$$

Das Verhältnis aus angezeigtem Strom und Kurzschlussstrom

$$\frac{I_M}{I_K} = \frac{U_L R_i}{U_L (R_i + R_M)} = \frac{1}{1 + \frac{R_M}{R_i}} \tag{2.15}$$

ist in Abhängigkeit von R_M/R_i in Bild 2.5 dargestellt. Für $R_M \ll R_i$ ist $I_M/I_K = 1$. Ist der Messwertwiderstand gleich dem Innenwiderstand der Quelle, so wird nur der halbe Kurzschlussstrom angezeigt.

Spannungsmessung

Die im vorausgegangenen Abschnitt vorgestellten Strommesser werden zur Spannungsmessung verwendet, indem der über das Messgerät fließende Strom mit dessen Widerstand multipliziert und das Ergebnis direkt als Spannung angezeigt wird. Im einfachsten Fall ist die Spannung einer Quelle mit der Leerlaufspannung U_L und dem Innenwiderstand R_i festzustellen (Bild 2.6). Das Messgerät mit dem Widerstand R_M wird an die Klemmen der Quelle angeschlossen, R_b ist nicht vorhanden. Damit fließt jetzt der Strom I und für den Kreis gilt die Maschengleichung:

$$I R_i + I R_M - U_L = 0. \quad (2.16)$$

Angezeigt wird die Spannung $U_M = I R_M$. Eingesetzt in die letzte Gleichung ergibt dies die Beziehung

$$U_M = U_L - I R_i. \quad (2.17)$$

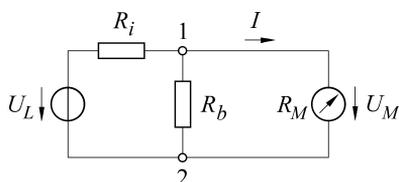


Bild 2.6 Zur Messung der an dem Verbraucher R_b abfallenden Spannung wird das Messgerät parallel zum Verbraucher angeschlossen

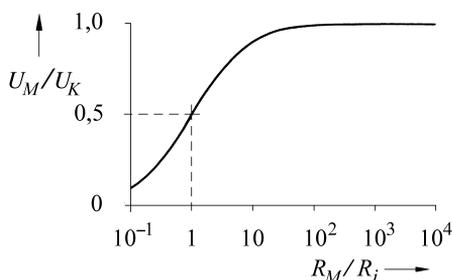


Bild 2.7 Um die Leerlaufspannung U_L zu messen, muss der Widerstand R_M des Messgeräts groß sein gegenüber dem Innenwiderstand R_i der Quelle

Das Instrument zeigt also nur die um den Spannungsabfall am Innenwiderstand verminderte Leerlaufspannung U_L an. Diese wird nur dann richtig gemessen, wenn der Term $I R_i$ zu vernachlässigen ist. Um dies zu erreichen, muss der über das Messwerk fließende Strom niedrig und der Widerstand dementsprechend hoch sein. Wir erhalten die folgende Regel:

Der Widerstand eines Spannungsmessers soll möglichst groß sein;
Spannungen sind hochohmig zu messen.

Das Verhältnis aus angezeigter Spannung und Leerlaufspannung

$$\frac{U_M}{U_L} = \frac{I R_M}{I (R_i + R_M)} = \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_M}} \quad (2.18)$$

ist nur für $R_M \gg R_i$ gleich 1 (Bild 2.7). Bei $R_i = R_M$ wird die halbe Leerlaufspannung angezeigt.

Liegt zwischen den Klemmen 1 und 2 von Bild 2.6 der Verbraucher R_b , so zeigt das Messinstrument die am Verbraucher liegende Spannung an. Um sie nicht zu beeinflussen, muss der Widerstand des Messwerks groß gegenüber dem des Verbrauchers sein.

Messung des Innenwiderstandes

Aus den bisherigen Ausführungen gehen die folgenden drei Verfahren zur Messung des Innenwiderstandes hervor:

- a) Messung der Leerlaufspannung und des Kurzschlussstroms und Bestimmung des Innenwiderstandes nach der Gl. (2.13) $R_i = U_L/I_K$.
- b) Messung des von der Quelle gelieferten Stroms bei Veränderung des Widerstandes R_M des Strommessers; wird der halbe Kurzschlussstrom angezeigt, so gilt $R_i = R_M$.
- c) Messung der von der Quelle gelieferten Spannung bei Veränderung des Widerstandes R_M des Spannungsmessers; wird die halbe Leerlaufspannung angezeigt, so gilt $R_i = R_M$.

Messbereichserweiterung beim Drehspulinstrument

In der täglichen Praxis sind Messgeräte mit mehreren umschaltbaren Messbereichen sehr vorteilhaft. Sie geben dem Anwender die gewünschte Flexibilität und gestatten die Messung niedriger und hoher Ströme oder Spannungen mit demselben Instrument. Eine derartige Messbereichsumschaltung über weite Bereiche ist mit einfachen Mitteln nur beim Drehspulinstrument möglich und hat maßgebend zu dessen großer Verbreitung beigetragen.

Umschaltbare Strommessbereiche. Um mit einem Messwerk noch einen den Messbereich überschreitenden Strom I messen zu können, wird im Nebenschluss zum Messwerk mit dem Widerstand R_M der Parallelwiderstand R_p gelegt.

Der gesamte zu messende Strom I teilt sich jetzt auf in einen Strom durch das Messwerk I_M und einen Strom I_p durch den Parallelwiderstand (Bild 2.8):

$$I = I_M + I_p . \tag{2.19}$$

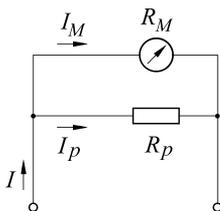


Bild 2.8 Erweiterung des Strommessbereichs durch einen Parallelwiderstand R_p

Der Spannungsabfall an R_M ist ebenso groß wie der an R_p :

$$R_M I_M = R_p I_p = R_p (I - I_M) , \tag{2.20}$$

womit die Vorschrift zur Dimensionierung von R_p gewonnen ist:

$$R_p = R_M \frac{I_M}{(I - I_M)} . \tag{2.21}$$

Beispiel 2.1

Hat das vorhandene Messwerk, bestehend aus Spule und Vorwiderstand, zur Temperaturkompensation z. B. einen Widerstand $R_M = 400 \Omega$ und einen Vollausschlag bei $I_M = 0,2 \text{ mA}$, und soll ein Strom $I = 1 \text{ mA}$ gemessen werden, so ist ein Parallelwiderstand von

$$R_p = 400 \frac{0,2}{1 - 0,2} \Omega = 100 \Omega$$

erforderlich.



Auf diese Weise lassen sich Widerstände für weitere Messbereiche ermitteln, die dann über einen Umschalter parallel zum Messwerk gelegt werden können. Dabei ist die zunächst nahe liegende Anordnung von Bild 2.9 a ungeeignet.

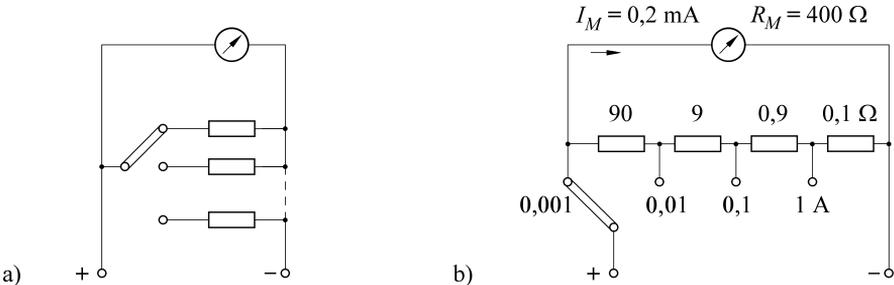


Bild 2.9 Umschaltung der Strommessbereiche bei einem Drehspulinstrument
 a) Die Kontaktwiderstände beeinflussen die Stromaufteilung
 b) Die Kontaktwiderstände führen nicht zu Fehlern

Hier liegen die Übergangswiderstände der Schaltkontakte in Reihe mit dem Parallelwiderstand und verfälschen das Verhältnis R_M/R_p . Besser ist, den für den niedrigsten Messbereich erforderlichen Widerstand aufzuteilen und über einen im Hauptzweig sitzenden Schalter anzuwählen (Bild 2.9 b).

In unserem Beispiel wird der Widerstand von 100 Ω durch die vier Widerstände 90 Ω, 9 Ω, 0,9 Ω und 0,1 Ω gebildet. Die Übergangswiderstände des Kontakts beeinflussen nicht mehr die Stromaufteilung in der Parallelschaltung. Sie addieren sich lediglich zum Innenwiderstand der Quelle und zu dem Lastwiderstand im Stromkreis und sind diesen gegenüber zu vernachlässigen.

Beispiel 2.2

Das Messgerät von Bild 2.9 zeigt bei einem Strom $I_M = 0,2 \text{ mA}$ Vollausschlag. Ist ein Messbereich von 100 mA eingestellt, so liegen die Widerstände $(9 + 90 + 400) \Omega$ und $(0,9 + 0,1) \Omega$ parallel. Mit $I_p : I_M = 499 : 1$ und $I_M = 0,2 \text{ mA}$ wird $I_p = 99,8 \text{ mA}$. Wie beabsichtigt, ist $I = I_M + I_p = 0,2 \text{ mA} + 99,8 \text{ mA} = 100 \text{ mA}$.

Umschaltbare Spannungsmessbereiche. An dem Messwerk unseres Beispiels mit einem Messbereich von 1 mA liegt bei Vollausschlag die Spannung U_M von

$$U_M = 1 \text{ mA} \cdot (400 \Omega \parallel 100 \Omega) = 80 \text{ mV}. \tag{2.22}$$

Um höhere Spannungen messen zu können, wird ein Vorwiderstand verwendet. Die gesamte zu messende Spannung U fällt dann mit U_v am Vorwiderstand und mit U_M am Messwerk ab (Bild 2.10):

$$U = U_v + U_M = R_v I + (R_p \parallel R_M) I. \tag{2.23}$$

Indem die letzte Gleichung umgestellt wird, ergibt sich die Rechenvorschrift zur Dimensionierung von R_v :

$$R_v = \frac{U}{I} - (R_p \parallel R_M). \tag{2.24}$$

Um mit unserem Messwerk 100 mV zu messen, ist also ein Vorwiderstand von

$$R_V = \frac{100 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} - 80 \Omega = 20 \Omega \tag{2.25}$$

erforderlich.

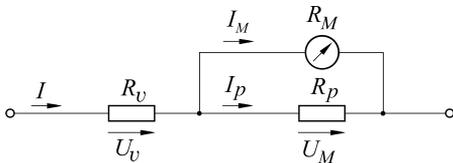


Bild 2.10 Erweiterung des Spannungsmessbereichs durch einen Vorwiderstand R_V

Auf dieselbe Weise werden die Vorwiderstände für weitere Spannungsmessbereiche berechnet. Für den Messbereich 1 V ist bei einer Stromaufnahme von 1 mA ein Gesamtwiderstand von 1000 Ω erforderlich. Da jedoch für den 0,1-V-Messbereich schon 100 Ω vorhanden sind, wird zusätzlich nur noch ein Widerstand von 1000 $\Omega - 100 \Omega = 900 \Omega$ benötigt (Bild 2.11).

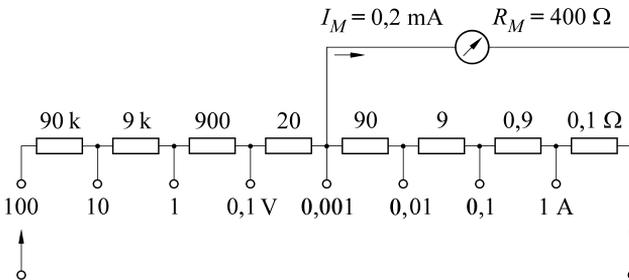


Bild 2.11 Drehspulinstrument mit umschaltbaren Strom- und Spannungsmessbereichen

Die Spannungsmesser messen nur dann rückwirkungsfrei, wenn ihr Innenwiderstand genügend hoch ist. Dieser wird von den Herstellern auf den Messbereichsendwert bezogen. Die Angabe 1 k Ω /V z. B. bedeutet, dass – unabhängig von dem Ausschlag des Zeigers – im 100-V-Messbereich ein Widerstand von 100 k Ω zwischen den Geräteklammern liegt.

Einsatz von Dioden

Um die Messwerke vor einer Überlastung zu schützen, ihren Messbereich gezielt zu beeinflussen oder um auch Wechselströme messen zu können, werden Halbleiterdioden oder ihre Sonderform, die Zenerdioden, eingesetzt. Diese werden in Reihe mit einem ohmschen Widerstand betrieben und es stellt sich dann die Aufgabe, den im Kreis fließenden Strom und die an den Bauelementen abfallenden Spannungen zu bestimmen. Die Lösung lässt sich einfach auf grafischem Weg finden (Bild 2.12).

Als Abszisse wird die an die Bauelemente insgesamt angelegte Spannung U_B genommen. Vom Koordinaten-Nullpunkt aus wird dann die Kennlinie des nichtlinearen Elements (in unserem Beispiel die der Diode) gezeichnet. Vom Wert der Versorgungsspannung aus wird nach links die des Widerstandes aufgetragen. Die beiden Kennlinien schneiden sich. Die Ordinate des Schnittpunktes bezeichnet den im Kreis fließenden Strom I_B , die Abszisse die an der Diode abfallende Spannung U_{DB} , sodass für den Widerstand die Spannung $U_{RB} = U_B - U_{DB}$ übrig bleibt.

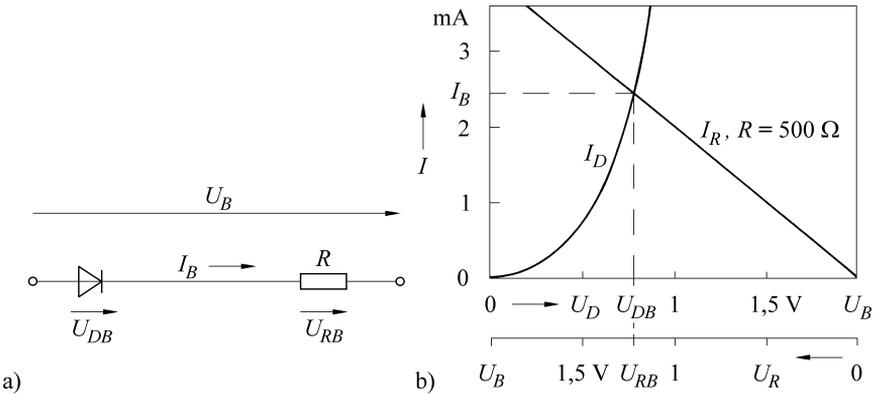


Bild 2.12 Bestimmung der Spannungen und Ströme in einer Reihenschaltung von Diode und Widerstand. a) Schaltung, b) Kennlinien

Anwendung der Dioden zur Messbereichsbegrenzung. Wird eine in Sperrichtung gepolte Zenerdiode in Reihe mit dem Messgerät gelegt, so kann erst dann über das Instrument ein Strom fließen, wenn die anliegende Spannung U größer als die Zenerspannung U_Z ist. Der Anfang des Messbereichs wird unterdrückt (Bild 2.13 a).

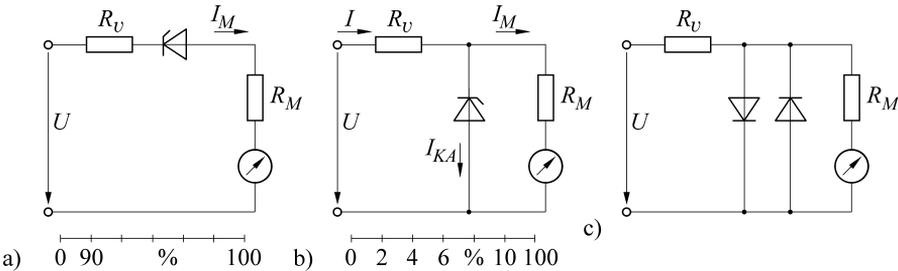


Bild 2.13 Begrenzerschaltungen am Drehspulinstrument. a) unterdrückter Anfangsbereich, b) unterdrückter Endbereich, c) Überlastschutz des Messwerks

Liegt die Zenerdiode parallel zum Messgerät, so fließt zunächst der ganze Strom über das Messgerät. Die Zenerdiode wird stromführend, wenn der Spannungsabfall am Messgerät mit dem Widerstand R_M größer als die Zenerspannung wird (Bild 2.13 b). Von diesem Arbeitspunkt an bleibt der Strom über das Messgerät praktisch konstant und eine eventuelle

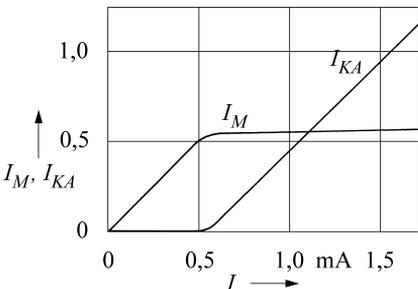


Bild 2.14 Überlastsicherung eines Messwerks nach Bild 2.13 b
 I_M Strom durch das Messgerät ($R_M = 3\text{ k}\Omega$)
 I_{KA} Strom durch die Zenerdiode ($U_Z = 1,5\text{ V}$)

weitere Zunahme des Gesamtstroms führt zu einem größeren Strom über die Zenerdiode (Bild 2.14). Gemessen wird nur in dem Bereich, in dem die Zenerdiode noch sperrt.

Auf dieselbe Weise lässt sich ein Messwerk vor Überlastung schützen. Zwei Dioden liegen antiparallel zum Messwerk. Wird der Spannungsabfall am Messwerk größer als 0,7 V, so wird eine der Dioden leitend und schützt das Messwerk vor einem zu großen Strom (Bild 2.13 c).

2.1.3 Messung von Wechselstrom und Wechselspannung

Begriffe. Ein zeitlich veränderliches Signal $x(t)$ hat den auf die endliche Beobachtungsdauer T bezogenen linearen Mittelwert

$$\overline{x(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \, dt. \quad (2.26)$$

Dieser Mittelwert entspricht dem Gleichanteil des Signals. Ist der Mittelwert null, so liegt ein reines Wechselsignal vor.

Wird das Signal vor der Mittelung erst gleichgerichtet, d. h., wird erst der Betrag gebildet, so wird der Gleichrichtwert $\overline{|x(t)|}$ erhalten:

$$\overline{|x(t)|} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| \, dt. \quad (2.27)$$

Der Mittelwert $\overline{x^2(t)}$ ist der Mittelwert aus dem quadrierten Signal:

$$\overline{x^2(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) \, dt. \quad (2.28)$$

Die Wurzel aus dem Mittelwert des quadrierten Signals gibt den Effektivwert X_{eff} (Quadratischer Mittelwert):

$$X_{\text{eff}} = X = \sqrt{\overline{x^2(t)}}. \quad (2.29)$$

Der Effektivwert wird auch quadratischer Mittelwert genannt. Zur Ermittlung des Effektivwertes einer Summe von Einzelsignalen sind die Mittelwerte der quadrierten Einzelsignale zu addieren und anschließend ist aus der Summe die Wurzel zu ziehen.

Bei einer sinusförmigen Wechselspannung $u(t) = \hat{u} \sin \omega t$ (Bild 2.15) lauten die entsprechenden Größen:

$$\text{Linearer Mittelwert } \bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{u} \sin \omega t \, dt = 0 \quad (2.30)$$

$$\text{Gleichrichtwert } \overline{|u|} = \frac{1}{T} \int_0^T |\hat{u} \sin \omega t| \, dt = \frac{2}{\pi} \hat{u} = 0,637 \hat{u} \quad (2.31)$$

$$\text{Effektivwert } U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\hat{u} \sin \omega t)^2 \, dt} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = 0,707 \hat{u}. \quad (2.32)$$

Die angegebenen Zahlenwerte gelten für sinusförmige Signale und nehmen für andere Kurvenformen abweichende Werte an. Der jeweilige zeitliche Verlauf der Größe, z. B. sinusförmig, rechteckförmig oder dreieckförmig, kann durch einen der folgenden Faktoren charakterisiert werden:

$$\begin{aligned} \text{Scheitelfaktor} &= \frac{\text{Scheitelwert}}{\text{Effektivwert}} \\ &= \frac{\hat{u}}{0,707 \hat{u}} = 1,41 \quad \text{für sinusförmige Größen,} \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} \text{Formfaktor} &= \frac{\text{Effektivwert}}{\text{Gleichrichtwert}} \\ &= \frac{0,707 \hat{u}}{0,637 \hat{u}} = 1,11 \quad \text{für sinusförmige Größen.} \end{aligned} \quad (2.34)$$

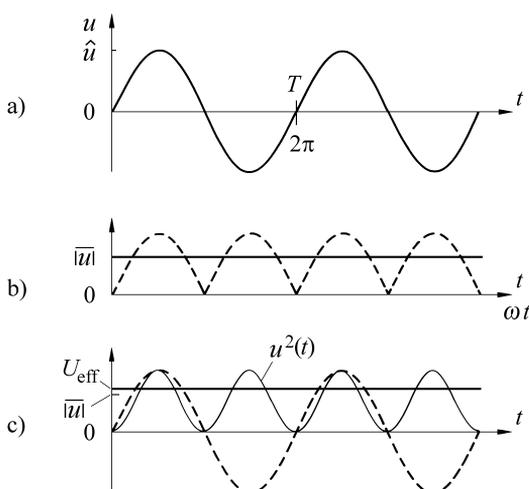


Bild 2.15 Wechselspannungsgrößen
 a) Augenblickswert, b) Gleichrichtwert
 c) $u^2(t)$ und Effektivwert U_{eff}

Messung des Scheitelwertes; Spitzenwert-Gleichrichtung

Um den Scheitelwert zu messen, ist er zunächst zu speichern. Dazu dient der in Bild 2.16 gezeichnete Kondensator. Er wird über die Diode auf die Spannung U_C aufgeladen, die gleich dem Spitzenwert der angelegten Spannung, vermindert um die Durchlassspannung der Diode von etwa 0,7 V ist; $U_C = \hat{u} - 0,7 \text{ V}$. U_C wird mit dem parallel liegenden Drehspulinstrument erfasst. Über den hohen Widerstand R_M des Messinstruments entlädt sich der Kondensator etwas, bis seine Spannung mit der nächsten ansteigenden Signalfanke wieder ihren Maximalwert erreicht.

In der Schaltung von Bild 2.16 wird der Kondensator nur während der positiven Halbwelle aufgeladen und misst so nur die positive Scheitelspannung \hat{u}_+ .

In den Fällen, in denen der positive und der negative Spitzenwert unterschiedlich sind, ist ein zweiter Gleichrichter mit Kondensator zur Messung des negativen Scheitelwertes \hat{u}_- erforderlich. In Bild 2.17 c sind die beiden Kapazitäten in Reihe geschaltet. Die obere wird während der positiven Halbwelle, die untere während der negativen aufgeladen. Das Instrument zeigt dann die Summe der beiden Kondensatorspannungen und damit die Summe $\hat{u}_+ + \hat{u}_-$ der beiden Scheitelwerte der angelegten Wechselspannung an.

Index

A

A/D-Umsetzer 284
–, Delta-Sigma-Umsetzer 296
–, direkt vergleichende 286
–, Flash- 289
– für mechanische Größen 308
– in Messgeräten 304
–, Kaskaden-Parallel- 289
–, Kenngrößen 299
– mit parallelen Komparatoren 74, 288
– mit sukzessiver Annäherung 290
–, Simultan- 289
–, u/f -Ladungsbilanz- 294
–, u/t -Zweirampen-Umsetzer 292
–, Wäge-Umsetzer 290
Abgleichbrücke 238
Ablaufsteuerung 412
Ablenkkoeffizient 101
Absolutdruckmessung 226
Abtast- und Halteglied 284
Abtast- und Haltekreis 66
Abtastfrequenz 355, 363, 374
Abtasttheorem 300, 355
Addierverstärker 127
Aiken-Code 263
Ampere Darstellung 24
Amplituden- u. Phasengang 48
Amplitudengang 51, 357
Amplitudenspektrum 388
analoger Ausgabekanal 408
Anhängen von Nullen 360, 374
Anwenderprogramm 392
aperiodischer Grenzfall 59
astabile Kippschaltung 315 f.
asynchrone Übertragung 394
Auflösungsvermögen 311
Aufnehmer 16, 74
–, chemischer 154
–, Differenzial-Widerstands- 229
–, elektrodynamischer 137
–, für ionisierende Strahlung 175
–, induktiver 242
–, kapazitiver 250

–, optischer 167
–, piezoelektrischer 159, 162
–, pyroelektrischer 159
–, Queranker 245
–, Tauchanker 243
–, thermischer 146
–, Widerstands- 198
Aufweckempfänger 428
Aufweckschaltung 428
Ausschlagbrücke 241
Auswerten 412
Autokorrelationsfunktion 389 f.
Autoleistungsdichtespektrum 388 ff.
Avogadro-Konstante 18
Avogadro-Projekt 22

B

Bandbreite 65
Bartlett-Fenster 379
BCD-Zahlen 263
Bedienungsanforderung 400
Beschleunigungssensor 347
Biasstrom 133
Biegeschwinger 327
Binärcode 262
binäres Signal 261, 286
bistabile Kippstufe 266
Bit 262
Blackman-Fenster 382
Blindleistung 94 f., 98
Boltzman-Konstante 18
Braun'sche Röhre 99
Brücke, spannungsgespeist 190
–, stromgespeist 190
Brückenschaltung 184 f.
Bussystem 392
Buszugriffsverfahren 393

C

Candela 28
Candela Darstellung 28
CdS-Fotowiderstand 215
codierte Längen- und Winkelgeber 309
Counter 408

D

Dehnungsmessstreifen 218
 Delta-Sigma-Umsetzer 296
 Diagnose 385
 Dichtemessung 348, 351
 Dickenscherschwinger 327
 Differenzdruck-Messumformer 254
 Differenzdruckmessung 226
 Differenzial-Kondensator 242
 Differenzial-Tauchanker-Geber 245
 Differenzial-Transformator 138
 differenzielle Nichtlinearität 299
 Differenzierglied 63
 Differenzverstärker 111
 digitaler Eingabe- und Ausgabekanal 408
 digitales Speicher-Oszilloskop 305
 Digital-Multimeter 304
 Digitaloszilloskop 305
 Diskrete Fouriertransformation DFT 353
 Diskrete Fouriertransformierte 390
 Diskriminator 288
 DMA-Kanal 407
 DMS 222
 Dokumentieren 413
 Doppelweggleichrichtung 90
 Drehmomentmessung 224
 Drehsulinstrument 80
 Drehsulmesswerk 79
 Drehstromsystem 96
 Drehzahlaufnehmer 139
 –, Induktions- 139
 Drehzahlmessung 279
 Dreieckfenster 379
 Druckmessdose 338
 Druckmessung 165, 221
 –, DMS 221
 – mit Schwingquarz 338
 –, piezoelektrisch 165
 D-Speicherglied 268
 dual slope converter 292
 duales Zahlensystem 261
 Duplex-Betrieb 394
 Durchflussmessung, Coriolis-
 Massendurchflussmesser 349
 –, Heißfilm 212
 –, Hitzdraht-Anemometer 212
 –, Induktions- 138, 144 f.
 –, magnetische 145
 –, thermischer Massenstrommesser 210
 –, Ultraschall- 338
 dynamisches Verhalten 48

E

Echtzeitverarbeitung 409
 Effekt, AMR 217
 –, äußerer Foto- 169, 173
 –, CMR 218
 –, ferroelektrischer 205
 –, Gauß- 216
 –, GMR 218
 –, innerer Foto- 169 f.
 –, Josephson- 25
 –, magnetoelastischer 249
 –, magnetoresistiver 216
 –, piezoelektrischer 159, 333
 –, piezoresistiver 225
 –, pyroelektrischer 160
 –, Seebeck- 146
 –, Sekundärelektronenemission 174
 –, Sperrschicht-Foto- 170
 –, thermoelektrischer 146
 –, thermomagentischer 213
 –, Thomson- 216
 –, Von-Klitzing- 26
 effektives Bit 302
 Effektivwert 88, 91, 232
 Einfügen von Nullen 374
 Eintor-Resonator 335
 Einweggleichrichtung 90
 Einzelelektronen-Pumpe 27
 Elektrizitätszähler 98
 elektrodynamischer Schwingungsgeber 343
 elektrodynamisches Instrument 93
 elektrodynamisches Messwerk 81
 elektromagnetischer Schwingungsgeber 344
 elektromechanische Messgeräte 79
 Elektronenstrahl-Oszilloskop 99
 Elektronenstrahl-Röhre 99
 Elektrostriktion 160
 Empfindlichkeit 29, 113
 Endlagenschalter 308
 Energie des elektrischen Feldes 257
 – des magnetischen Feldes 257

F

f/u -Umformung 281
 Fehler, absoluter 32
 –, bekannter 32
 –, dynamischer 65, 67, 205
 –, fehlerkorrigierender Code 263
 –, Korrektur 263
 –, Nullpunkt- 132
 –, Quantisierungs- 66, 276, 302

–, relativer 32
 –, systematischer 32
 –, zufälliger 37
 Feldplatte 216 f.
 Fensterfunktion 376
 Feuchtemessung 213
 –, kapazitiver Geber 254
 –, LiCl-Geber 213
 FIFO 406
 Flächenschwinger 327
 Flammen-Ionisationsdetektor 177
 Formfaktor 89
 Fotodiode 169
 Fotoelement 169
 Fotovervielfacher 167, 174
 Fotowiderstand 215
 Fotozelle 167, 173
 Fourier-Transformation 352
 –, diskrete 360
 –, inverse diskrete 364, 374
 –, nicht zeitbegrenzt Signal 366
 –, periodisches Signal 369
 –, zeitbegrenzt Signal 356
 –, zeitdiskretes Signal 353
 –, zeitkontinuierliches Signal 352, 354
 Fouriertransformierte 389
 Frequenzgang 48, 50
 Frequenzkammgenerator 21
 frequenzkompensierter Spannungsteiler 102
 Frequenzmessung 67, 278 f.
 Frequenzsignal 275
 Frequenzumsetzer 315
 Füllstandsmessung, kapazitive 252 f.
 – mit Kaltleiter 209
 Füllstandswächter 209
 Fundamentalkonstanten 18
 Funkkommunikation 428

G

Gasanalyse, SnO₂-Sensor 214
 –, Wärmetönungsmessung 213
 Gatter 266
 Gegenkopplung 72, 112
 Gerätesteuerung 404
 Gleichrichter, phasenselektiv 197
 Gleichrichtwert 88
 Gleichtaktunterdrückung 70, 111, 190
 Gleichtaktverstärkung 111
 Graetzschaltung 90
 grafische Entwicklungsumgebung 410
 Gray-Code 262
 Grenzfrequenz 49, 52

Grenzwerteinheit 288
 Grenzwertsatz, zentraler 43
 Größengleichung 29

H

Halbleiter-Dehnungsmessstreifen 225
 Halbleiter-Strahlungsdetektor 178
 Hall-Generator 141
 Hall-Sonde 140
 Hamming-Fenster 381
 Handshake-Signal 393
 Hardware 391
 Hardwareschnittstelle 393
 Hauptzipfel 377
 Heißleiter 30, 203
 Hitzdraht-Anemometer 210
 Hochpass 63

I

i/i-Verstärker 108, 123
i/u-Verstärker 108, 120
 Impedanzwandler 126
 Impulsantwort 48, 53, 55, 63
 Impulsratenmessung 278, 281
 Induktionsdrehzahlgeber 139
 induktiver Aufnehmer 242 f., 248, 260
 induktiver Schleifendetektor 248
 Induktivitätsmessung 232
 Infrarot-Sensor 165
 inkrementaler Längen- und Winkelgeber 310
 Instrumentieren 410
 Instrumentierungsverstärker 193 f.
 integrale Nichtlinearität 300
 Integrationsverstärker 317
 Integrierglied 64
 Interferometer 313
 invertierender Verstärker 333
 Ionisationskammer 175
 isosynchrone Übertragung 394

J

JK-Speicherglied 269
 Josephson-Effekt 25

K

Kalibrieren 411
 Kaltleiter 205
 Kapazitätsmessung 232
 kapazitive Füllstandsmessung 252 f.
 kapazitiver Aufnehmer 250
 Kelvin 28

Kelvin Darstellung 28
 Kennlinie 29
 Kettenstruktur 69
 Kilogramm Darstellung 22
 Kippschaltung 315, 318
 Komparator 286
 Komparator mit Hysterese 287
 Kompensationsdose 151
 Konstantspannungsquelle 125
 Konstantstromquelle 125, 182
 Korrelationskoeffizient 43
 Kovarianz 43 f.
 Kraftmessung, Kraftmessdose mit DMS 225
 –, magnetoelastische Kraftmessdose 249
 –, piezoelektrischer Aufnehmer 65
 Kreisstruktur 72
 Kreuzkorrelationsfunktion 389
 Kreuzleistungsdichtespektrum 388 f.
 Kurzschlussring-Sensor 247

L

LabVIEW 414
 ladungsempfindlicher Verstärker 131
 Ladungsverstärker 164
 Lambda-Sonde 158
 Längen- und Winkelmessung, codierte Geber 314
 –, Dehnungsmessstreifen 218
 –, inkrementaler Geber 310
 –, Interferometer 313
 –, Kurzschlussring-Sensor 247
 –, Magnetschranke 142
 –, Queranker-Aufnehmer 245
 –, Tauchanker-Aufnehmer 243
 –, Widerstandsferngeber 198
 Längsschwinger 327
 LC-Oszillator 321
 Leerlaufspannung 32, 82 f.
 Leistungsmessung bei Drehstrom 96
 – bei Gleichspannung 93
 – bei Wechselspannung 94
 – im Zeit- und Frequenzbereich 386
 lichtempfindlicher Widerstand 215
 Lichtmessung, Fotodiode 167
 –, Fotoelement 167
 –, Fotovervielfacher 167
 –, Fotowiderstand 215
 –, Fotozelle 167
 –, Tabelle 169
 Linearisierung, Kennlinie 226
 logarithmischer Verstärker 132
 Luftmassenmesser 210, 212

M

Magnetfeldmessung, Induktionsaufnehmer 139
 magnetische Feldkonstante 243
 Mantel-Thermoelement 49
 Massenstrommesser 350
 MATLAB/SIMULINK 419
 maximaler Abtastfehler 377
 mechanische Schwingungen 341
 Messbereichsbegrenzung 87
 Messbereichserweiterung 84
 Messbrücke, Ausschlag- 241
 –, Maxwell- 240
 –, Maxwell-Wien- 240
 –, Wien- 239
 Messeinrichtung 16
 Messfehler 47
 Messgeräte, statisches Verhalten 29
 Messkette 70
 Messsystem, energieautarkes 424
 –, funkabfragbares 424
 Messunsicherheit 47
 Messverstärker 107, 195
 Messwerterfassung 411
 Messzeit 374
 Metalloxid-Gassensor 214
 microchannel plate 174
 Mikrokanalplatte 174 f.
 Mitkopplung 72
 Mittelwert, linearer 88
 Moiré-Streifen 313
 Mol 28
 Mol Darstellung 28
 monostabile Kippstufe 282, 348
 Monotoniefehler 300
 Multiplexer 274, 284, 406
 Multiplizierer, Hall-Multiplizierer 142
 –, Parabel-Multiplizierer 128
 Multivibrator 315

N

Naturkonstanten 17
 nichtinvertierender Verstärker 114
 Normalverteilung 34
 NTC-Widerstand 49
 Nullpunktunterdrückung 190

O

Oberflächenwelle 333
 off-line-Verarbeitung 409
 Offset 132, 194, 317
 Offsetspannung 194

OFW-Sensor 333
 on-line-Verarbeitung 409
 Operationsverstärker 110, 117, 132, 137
 –, Tabelle 117
 optische Aufnehmer 167
 Oszillator, harmonischer 320
 –, LC- 321
 –, Quarz- 279
 –, RC- 324
 –, Relaxations- 202
 Oszilloskop, analoges 102
 –, digitales 305

P

Parallelregister 271
 Parallelstruktur 70, 190
 Parametrieren 410
 Parseval'sches Theorem 386
 Parseval-Theorem 389 f.
 Periodendauermessung 276
 Phasengang 51
 Phasenmessung, digital 278
 –, gesteuerter Gleichrichter 235
 Phasenregelung 340
 Phasenschieber-Brücke 241
 Phasenwinkelmessung 235, 277
 pH-Messkette 155
 Physikalische Effekte 76
 piezoelektrischer Aufnehmer 162
 piezoelektrischer Effekt 333
 piezoelektrischer Resonator 326
 piezoelektrischer Schallgeber 338
 piezoresistiver Effekt 225
 Plank'sches Gesetz 167
 Plank'sches Wirkungsquantum 18
 Platin-Messwiderstand 201
 Plug-and-Play 398
 Positionsmessung 142, 172
 Protokoll 393
 PTC-Widerstand 205
 Pulsweitenmodulation 408
 PVDF 160
 pyroelektrischer Effekt 160
 pyroelektrischer Sensor 165

Q

Quanten-Hall-Effekt 26
 Quantisierungsfehler 276, 302
 Quantisierungsrauschen 302, 304
 Quarz 326
 Quarzoszillator 332
 Queranker-Aufnehmer 245, 247

R

radizierender Verstärker 130
 Rauschen 137
 RC-Oszillator 324
 RC-Spannungsteiler 104
 RC-Tiefpass 52, 281 f.
 Rechteckfenster 378
 Register 271
 Reifendruckmessung 338
 Relaxationsoszillator 315
 Remote Sensing 337
 reziproker piezoelektrischer Effekt 160
 RS-Speicherglied 266 f.
 Rückwirkung 31, 103

S

Sägezahngenerator 104
 SAW surface acoustic wave 333
 Schadensfrüherkennung 385
 Scheinleistung 94, 96
 Scheitelfaktor 89
 Schieberegister 272 f.
 Schnittstelle 392
 Schnittstellennachricht 401
 schwarzer Körper 167
 Schwingbeschleunigung 342
 Schwinggeschwindigkeit 342
 Schwingkreis 237
 Schwingquarz, Frequenznormal 326
 –, Temperaturfühler 333
 Schwingungsmessung 315
 –, absolute 345
 –, relative 342
 Schwingweg 342
 SCPI 404
 Seebeck-Effekt 146
 seismischer Aufnehmer 342, 346
 Sekunde Darstellung 20
 Sensor, Beschleunigungs- 347
 –, Differenzial-Widerstands- 229
 –, Druck- 347
 –, Foto- 172
 –, funkabfragbarer 336, 424
 –, Gas- 214
 –, Hall- 142
 –, induktiver 242, 260
 –, Infrarot- 165
 –, integrierter 78
 –, kapazitiver 242, 250
 –, Kurzschlussring- 247
 –, magnetoresistiver 217
 –, NTC- 49

–, OFW-Laufzeit- 335
 –, ohmscher 180
 –, optischer 167
 –, optoelektronischer 169
 –, OWF-Laufzeit 333
 –, piezoelektrischer 159
 –, pyroelektrischer 159
 –, Sauerstoff- 157
 –, Schwingungs- 350
 –, Silizium- 207
 –, SnO₂- 214
 –, Taguchi- 214
 –, Temperatur- 153
 –, thermischer 146
 –, Widerstands- 198
 sensornahe Signalverarbeitung 77
 SI-Einheiten 18
 Sigma-Delta-Umsetzer 298
 Signal/Rausch-Verhältnis 299, 302
 Sinusantwort 48, 50
 Sinus-Spektrum 371 f.
 SI-System 18
 Software 392
 Softwareschnittstelle 392
 Solarzelle 424
 Spannung/Frequenz-Umsetzer 292
 Spannung/Zeit-Umsetzer 292
 Spannungsfolger 125
 Spannungsmessung 83
 –, A/D-Umsetzer 284
 –, Anzeigegerät 80, 85, 304
 –, Josephson-Effekt 25
 –, Modulations- 195
 –, Nullpunktfehler 133
 –, Offsetgrößen 132, 134, 194
 –, Oszilloskop 103
 –, Verstärker 114
 Spektralanalyse 352
 Sperrschicht-Fotoeffekt 170
 Sperrschicht-Temperatursensor 153
 Spinventil 218
 Spitzenwertgleichrichter 126
 Spitzenwert-Gleichrichtung 90
 spreading resistance sensor 207
 Sprungantwort 48, 55, 62
 SrTiO₃-Sensor 214
 Standard Commands for Programmable Instruments 404
 Standardabweichung 34, 39
 Standardabweichung, empirisch 34
 Statusabfrage 400
 Stichprobe 35
 Stimmgabel-Frequenzumsetzer 348

Strahlungsdetektor, Halbleiter-Detektor 175
 –, Ionisationskammer 175
 Strahlungsthermometrie 165
 Stromgenerator 109
 Strommessung 82
 –, Anzeigegerät 82
 –, Hallsonde 142
 –, Nullpunktfehler 135
 –, Offsetgrößen 135
 –, Verstärker 108
 Student'sche t -Verteilung 41
 Subtrahierverstärker 128, 191
 Superposition 133
 Systemprogramm 392
 Szintillationsmesskopf 175

T

t/u -Umformung 281
 Taster 103
 Tauchanker-Aufnehmer 243
 Temperaturkoeffizient 199 f., 203
 Temperaturmessung, berührungslose 167
 –, Berührungsthermometer 208
 –, Heißleiter 203
 –, integrierter Sensor 153
 –, Kaltleiter 205
 –, Quarz 333
 –, spreading resistance sensor 207
 –, Tabelle 208
 –, Thermoelement 146
 –, verfahrenstechnische Größen 209
 –, Widerstandsthermometer 199
 Temperaturspannung 111
 Thermistor 203
 thermoelektrischer Effekt 146
 Thermoelement 146, 151
 Thermoumformer 91
 Thomson-Messbrücke 185
 Tiefpass 50, 64
 Timer 407
 Torzeit 278
 Trägerfrequenz-Brücke 195
 Transformatorbrücke 233
 Transientenrecorder 306
 Treiber 392
 Triggerung 280
 T -Speicherglied 269
 Tukey-Fenster 383

U

u/i -Verstärker 108
 u/u -Verstärker 108
 UART-Controller 395

Übergangsfunktion 48
 Übertragungsfaktor 30, 49
 Uhr, Caesium 20
 –, optisch 21
 Ultraschall-Durchflussmesser 338
 Ultraschallwandler 338
 Universalzähler 279
 Univibrator 281
 Unsicherheit 42

V

V-Abtastung 310
 Varianz 34, 43
 Vergleichsstelle 150
 Verhältnisbildung 71
 Verlustwinkel 231
 Verstärker, Elektrometer- 192
 – für Brückenschaltungen 191
 –, Lock-in- 196
 –, Nullpunktfehler 132
 –, Offsetgrößen 132
 –, Operations- 110
 –, Spannung 108
 –, Spannungsverstärker 114
 –, Strom 108, 120, 123
 –, Trägerfrequenz- 196
 –, Wechselspannungs- 196
 Vertrauensbereich 36
 Verzögerungsglied 1. Ordnung 49
 – 2. Ordnung 56
 virtuelles Messgerät 413
 Volt 25

Von-Hann-Fenster 380
 Von-Klitzing-Effekt 26

W

Wäge-Umsetzer 290
 Wandler, magnetischer 426
 –, solarer 424
 –, thermischer 425
 Wattwaage 22
 Wechselstrom-Gleichstrom-Komparator 92
 Weg- und Winkelmessung 138
 Wheatstone-Messbrücke 184
 Widerstandsaufnehmer 180
 Widerstandsmessung 180, 183, 187, 202
 Widerstandstemperaturfühler 199
 Widerstandsthermometer 199
 Wiener-Chintschin-Theorem 388
 Wirkleistung 95

Z

Zahlenwertgleichung 29
 Zähler 270
 Zeitbasis 278
 Zeitintervallmessung 276, 281
 Zeitmessung 275 f.
 Zenerdiode 86 f., 125
 Zentraler Grenzwertsatz 43
 zero padding 361
 Ziffernanzeige 264
 Zweirampen-A/D-Umsetzer 292
 Zwei-Tor-Resonator 334