

Vorwort zur 10. Auflage

Dank des Interesses der Leser kann die *Elektrische Messtechnik* jetzt in der 10. Auflage erscheinen. Das Buch ist nicht mehr ganz jung. So bestand und besteht weiterhin die Aufgabe, mit der Entwicklung der Messtechnik Schritt zu halten. Das ist natürlich machbar. Schwerer hingegen ist es dann, die Details zu definieren, auf die verzichtet werden kann. Das Buch soll ja handhabbar bleiben. Die Autoren geben sich Mühe, beiden Gesichtspunkten gerecht zu werden.

Das Buch soll in Zukunft auf einer noch breiteren Grundlage stehen. So wird Herr Univ. Prof. Dr.-Ing. Bernhard Zagar sein Wissen und seine Erfahrungen als Autor einbringen.

Das Anliegen des ersten Kapitels soll hier noch einmal kurz hervorgehoben werden: Es ist keine Einführung im üblichen Sinn. Das Kapitel geht zunächst auf das wissenschaftliche Fundament der gesamten Messtechnik ein. Dieses ist notwendig, um die physikalischen Größen unabhängig von Ort und Zeit und widerspruchsfrei messen zu können. Dazu soll das System der Einheiten auf Naturkonstanten zurückgeführt werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden dann – unabhängig von der Gerätetechnik – die charakteristischen Eigenschaften der Messsysteme angesprochen. Nun muss man sich aber bei Beginn der Beschäftigung mit der Messtechnik noch nicht mit den Grenzen des Messbaren befassen. Auch hat man noch nicht den Überblick über die vielen unterschiedlichen Methoden. So kann es sinnvoll sein, beim Studium des Buches mit dem Kapitel 2 zu beginnen und fallweise zu den Grundlagen des Kapitels 1 zurückzublättern.

Hingewiesen sei noch auf die Web-Seite

www.schruefer-messtechnik.de

Hier finden die Nutzer Aufgaben und Lösungen und können das eigene Wissen anhand der Übungsaufgaben kontrollieren. Davon machen die Studierenden erfreulicherweise regen Gebrauch. So wird die Web-Seite mehrere tausend mal im Jahr aufgerufen.

Die Herstellung des Buches lag auf Seiten des C. Hanser Verlags in den bewährten Händen von Herrn Dr. Martin Feuchte, Frau Franziska Kaufmann und Frau Angelika Vogt. Die Autoren sind ihnen allen zu großem Dank verpflichtet.

München, Mai 2012

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 Berhard Zagar

Inhalt

1

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 Einheitenystem, 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	33
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	48
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	Sensornaher Signalverarbeitung	77

2	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	92
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	112
2.3.3	Invertierender Stromverstärker	119
2.3.4	Anwendungen des Spannungsverstärkers	123
2.3.5	Anwendungen des Stromverstärkers	125
2.3.6	Nullpunktfehler des realen Operationsverstärkers	131
2.4	Elektrodynamische spannungsliefernde Aufnehmer	136
2.4.1	Weg- und Winkelmessung	136
2.4.2	Drehzahlaufnehmer	137
2.4.3	Hall-Sonde	139
2.4.4	Induktions-Durchflussmesser	142
2.5	Thermische spannungsliefernde Aufnehmer	144
2.5.1	Thermoelement	144
2.5.2	Integrierter Sperrschiert-Temperatur-Sensor	151
2.6	Chemische spannungsliefernde Aufnehmer und Sensoren	152
2.6.1	Galvanisches Element	152
2.6.2	pH-Messkette mit Glaselektrode	153
2.6.3	Sauerstoffmessung mit Festkörper-Ionenleiter	155
2.7	Piezo- und pyroelektrische ladungsliefernde Aufnehmer	158
2.7.1	Wirkungsweise und Werkstoffe	158
2.7.2	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	160
2.7.3	Pyroelektrischer Infrarot-Sensor	164
2.8	Optische Aufnehmer und Sensoren	166
2.8.1	Fotoelement und Fotodiode	168
2.8.2	Fotosensoren für Positionsmessungen und zur Bilderzeugung	170
2.8.3	Fotozelle	172
2.8.4	Fotovervielfacher und Mikrokanalplatte	172
2.9	Aufnehmer für ionisierende Strahlung	173
2.9.1	Ionisationskammer	173
2.9.2	Halbleiter-Strahlungsdetektor	176

3 Messung von ohmschen Widerständen;

Widerstandsaufnehmer	178
3.1 Strom- und Spannungsmessung	178
3.1.1 Gleichzeitige Messung von Spannung und Strom	178
3.1.2 Vergleich mit einem Referenzwiderstand	179
3.2 Anwendung einer Konstantstromquelle	180
3.3 Brückenschaltungen	182
3.3.1 Abgleich-Widerstandsmessbrücke	182
3.3.2 Ausschlag-Widerstandsmessbrücke	184
3.4 Verstärker für Brückenschaltungen	189
3.4.1 Subtrahierer mit invertierendem Verstärker	189
3.4.2 Subtrahierer mit Elektrometer-Verstärkern	190
3.4.3 Trägerfrequenz-Brücke und -Messverstärker	193
3.5 Widerstandsaufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	196
3.6 Widerstandstemperaturfühler	197
3.6.1 Metall-Widerstandsthermometer	197
3.6.2 Heißleiter	201
3.6.3 Kaltleiter	203
3.6.4 Silizium-Widerstandstemperatursensor	205
3.6.5 Fehlermöglichkeiten bei der Anwendung von elektrischen Berührungsthermometern	206
3.7 Ermittlung verfahrenstechnischer Größen durch Temperaturmessungen	207
3.7.1 Füllstandswächter	207
3.7.2 Thermischer Massenstrommesser	208
3.7.3 Messung der Luftfeuchte; Messung von Gaskonzentrationen	211
3.8 Gassensoren mit halbleitenden Metalloxiden	212
3.9 Lichtempfindlicher Widerstand	213
3.10 Magnetisch steuerbarer Widerstand	214
3.10.1 Feldplatte	214
3.10.2 Anisotroper Magnetoresistiver Effekt (AMR)	215
3.10.3 Spinventil, Riesenmagnetowiderstand und Kolossaler Magnetowiderstand	216
3.11 Dehnungsmessstreifen	216
3.11.1 Prinzip	216
3.11.2 Metall-Dehnungsmessstreifen	217
3.11.3 Störgrößen	219
3.11.4 Anwendung der DMS zur Spannungsanalyse	220
3.11.5 Halbleiter-Dehnungsmessstreifen	223
3.12 Linearisieren der Widerstandsaufnehmer-Kennlinien	224
3.12.1 Linearisieren durch einen Vor- und/oder Parallelwiderstand	224
3.12.2 Messung der Spannungsdifferenz bei Differenzial-Widerstandsaufnehmern	227
3.12.3 Differenzial-Widerstandsaufnehmer in einer Halbbrücke	228

4	Messung von Blind- und Scheinwiderständen; induktive und kapazitive Aufnehmer	229
4.1	Strom- und Spannungsmessung	230
4.1.1	Messung der Effektivwerte	230
4.1.2	Vergleich mit Referenzelement	231
4.1.3	Getrennte Ermittlung des Blind- und Wirkwiderstandes	232
4.1.4	Messung eines Phasenwinkels	233
4.1.5	Strommessung in einem fremderregten Schwingkreis	235
4.2	Wechselstrom-Abgleichbrücke	236
4.2.1	Prinzip	236
4.2.2	Kapazität-Messbrücke nach Wien	237
4.2.3	Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell	238
4.2.4	Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell-Wien	238
4.2.5	Phasenschieber-Brücke	239
4.3	Wechselspannungs-Ausschlagbrücke	239
4.4	Induktive Aufnehmer	240
4.4.1	Tauchanker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	241
4.4.2	Queranker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	243
4.4.3	Kurzschlussring-Sensor	245
4.4.4	Anwendung der induktiven Längen- und Winkelgeber	245
4.4.5	Induktiver Schleifendetektor zur Erfassung von Fahrzeugen	246
4.4.6	Magnetoelastische Kraftmessdose	247
4.5	Kapazitive Aufnehmer	248
4.5.1	Änderung des Plattenabstands	248
4.5.2	Änderung der Plattenfläche	249
4.5.3	Geometrische Änderung des Dielektrikums	250
4.5.4	Änderung der Permittivitätszahl durch Feuchtigkeit oder Temperatur	252
4.6	Einsatz der induktiven und kapazitiven Abgriffe in Differenzdruck-Messumformern	252
4.7	Vergleich der induktiven und der kapazitiven Längenaufnehmer	254
4.7.1	Energie des magnetischen und des elektrischen Feldes	255
4.7.2	Größte der Brückenschaltung entnehmbare Leistung	256
4.7.3	Steuerleistung zum Verstellen der Aufnehmer	257
5	Digitale Grundschatungen; Zeit- und Frequenzmesstechnik	259
5.1	Darstellung, Anzeige und Ausgabe numerischer Messwerte	259
5.1.1	Duales Zahlensystem	259
5.1.2	Binärcodes für Dezimalzahlen	260
5.1.3	Ziffernanzeige; Vergleich mit Skalenanzeige	262
5.1.4	Umsetzung eines digitalen Signals in eine Spannung; Digital-Analog-Umsetzer; digital steuerbare Spannungsquelle	262
5.2	Bistabile Kippstufen	264
5.2.1	Asynchrones RS-Speicherglied	264
5.2.2	Taktgesteuertes RS-Speicherglied	265
5.2.3	Taktflankengesteuertes D-Speicherglied	266

5.2.4	Taktflankengesteuertes JK-Speicherglied	267
5.2.5	Taktflankengesteuertes T-Speicherglied	267
5.3	Zähler	268
5.3.1	Synchroner Vorwärts-Dualzähler	268
5.4	Register	269
5.4.1	Parallelregister	269
5.4.2	Schieberegister zur Parallel/Serien-Umsetzung	270
5.4.3	Schieberegister zur Serien/Parallel-Umsetzung	271
5.4.4	Multiplexer als Parallel/Serien-Umsetzer	272
5.5	Digitale Zeitmessung	273
5.5.1	Einführung	273
5.5.2	Digitale Messung eines Zeitintervalls	274
5.5.3	Messung einer Periodendauer	274
5.5.4	Messung eines Phasenwinkels	275
5.6	Digitale Frequenzmessung	276
5.6.1	Digitale Messung einer Frequenz oder einer Impulsrate	276
5.6.2	Messung des Verhältnisses zweier Frequenzen oder Drehzahlen	277
5.6.3	Messung der Differenz zweier Frequenzen oder Drehzahlen	277
5.6.4	Universalzähler	277
5.7	Analoge Messung eines Zeitintervalls oder einer Frequenz	279
5.7.1	Analoge Messung eines Zeitintervalls; t/u -Umformung	279
5.7.2	Analoge Messung einer Frequenz oder Impulsrate; f/u -Umformung	279

6 Analog/Digital-Umsetzer für elektrische und mechanische Größen 282

6.1	Abtast- und Halteglied	282
6.2	Direkt vergleichende A/D-Umsetzer	284
6.2.1	Komparator	284
6.2.2	Komparator mit Hysterese	285
6.2.3	A/D-Umsetzer mit parallelen Komparatoren	286
6.2.4	Kaskaden-Parallel-Umsetzer	287
6.2.5	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Annäherung an den Messwert	288
6.3	Spannung/Zeit- und Spannung/Frequenz-Umsetzer	290
6.3.1	u/t -Zweirampen-Umsetzer	290
6.3.2	u/f -Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren	292
6.3.3	Delta-Sigma-Umsetzer	294
6.4	Kenngrößen der Analog/Digital-Umsetzer	297
6.4.1	Kennlinie	297
6.4.2	Abtasttheorem	298
6.4.3	Umsetzrate und Auflösung	299
6.4.4	Quantisierungsrauschen, Zahl der effektiven Bit	300
6.5	Analog/Digital-Umsetzer in Messgeräten	302
6.5.1	Digital-Multimeter	302
6.5.2	Digitales Speicher-Oszilloskop	303
6.6	A/D-Umsetzer für mechanische Größen	306
6.6.1	Endlagenschalter	306
6.6.2	Codierte Längen- und Winkelgeber	307

6.6.3	Inkrementale Längen- und Winkelgeber	308
6.6.4	Vergleich der codierten und inkrementalen Längengeber	312
7	Schwingungsmessungen	313
7.1	Astabile Kippschaltungen als Frequenzumsetzer	313
7.1.1	Kippschaltung mit Verstärker und Komparator	313
7.1.2	Kippschaltung mit stabilisierten Hilfsspannungen	316
7.2	Harmonische Oszillatoren	318
7.2.1	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen	318
7.2.2	<i>LC</i> -Oszillator	319
7.2.3	<i>RC</i> -Oszillator	322
7.3	Piezoelektrische Resonatoren	324
7.3.1	Volumenschwingende Quarze	324
7.3.2	Oberflächenwellen OFW in Quarzen	331
7.3.3	Funkabfragbare Sensoren	334
7.3.4	Ultraschall-Durchflussmesser	336
7.4	Mechanische Schwingungen	339
7.4.1	Charakteristische Größen	339
7.4.2	Relative Schwingungsmessung	340
7.4.3	Absolute Schwingungsmessung	343
7.4.4	Monolithisch integrierter Beschleunigungssensor	345
7.4.5	Schwingsaiten-Frequenzumsetzer	346
7.4.6	Stimmgabel-Frequenzumsetzer	347
7.4.7	Coriolis-Massendurchflussmesser	349
8	Spektralanalyse	351
8.1	Aufgabenstellung	351
8.2	FTC eines zeitkontinuierlichen Signals	351
8.3	FTD eines zeitdiskreten Signals	352
8.3.1	Übergang vom zeitkontinuierlichen zum zeitdiskreten Signal ..	352
8.3.2	Unterschiede bei der Transformation eines zeitkontinuierlichen und eines zeitdiskreten Signals	353
8.3.3	Abtasttheorem	354
8.4	DFT eines abgetasteten, zeitbegrenzten Signals	355
8.4.1	Datensatz mit endlich vielen Werten; diskrete Spektralfunktion ..	355
8.4.2	Zusammenhang zwischen FTD und DFT; Anhängen von Nullen ..	359
8.4.3	Wahl der Abtastfrequenz	362
8.4.4	Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT	363
8.5	DFT eines abgetasteten, nicht zeitbegrenzten Signals	365
8.5.1	Konstantes Signal	365
8.5.2	Periodisches Signal	368
8.5.3	Anhängen von Nullen, Abtastfrequenz und Messzeit	373
8.5.4	Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT	373
8.6	Fensterfunktionen	375
8.6.1	Kriterien zur Beurteilung	375
8.6.2	Fensterfunktionen und ihre Spektren	376
8.6.3	Fensterung bei transienten Signalen	383

8.7	Anwendungen der DFT	384
8.8	Leistungsmessung im Zeit- und Frequenzbereich	385
9	Rechnerunterstützte Messsysteme	390
9.1	Einführung	390
9.2	Aufbau eines Personal Computers	390
9.2.1	Gerätetechnik	390
9.2.2	Software	391
9.3	Schnittstellen und Bussysteme	391
9.3.1	Einführung	391
9.3.2	Serielle RS-232-Schnittstelle und abgeleitete Schnittstellen	394
9.3.3	Universal Serial Bus USB	397
9.3.4	Paralleler IEC-Bus (GPIB-Bus, IEEE-488-Bus)	397
9.3.5	Kabellose Netzwerke; Bluetooth, WLAN und IrDA	401
9.4	Messgeräte mit integrierter digitaler Schnittstelle	402
9.4.1	Anschluss	402
9.4.2	Steuerung	403
9.5	Messgeräte ohne integrierte Schnittstelle	404
9.5.1	Prinzip	404
9.5.2	Aufbau einer Messkarte	404
9.6	Messprogramme	408
9.6.1	Aufgaben der Messprogramme	408
9.6.2	Ablauf eines rechnergestützten Messprozesses	409
9.6.3	Virtuelles Messgerät	412
9.6.4	LabVIEW	413
9.6.5	MATLAB	418
9.7	Energieautarke, funkabfragbare verteilte Messsysteme	423
Literatur	429
Index	439

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

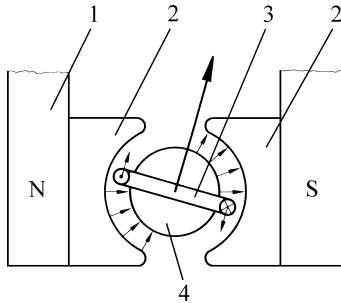
$$F_e = l N B I, \quad (2.1)$$

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

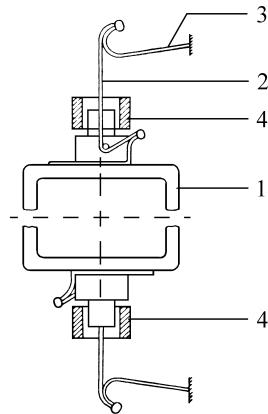
$$M_e = 2 \frac{d}{2} l N B I = A N B I \quad (2.2)$$

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 Polschuh, 3 Drehspule,
4 Kern aus Weicheisen

**Bild 2.2** Spannbandlagerung

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

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

$$\alpha = \frac{ANB}{c} I = kI, \quad (2.5)$$

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

$$E = \frac{d\alpha}{dI} = k = \frac{ANB}{c} \quad (2.6)$$

ist konstant.

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

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

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.

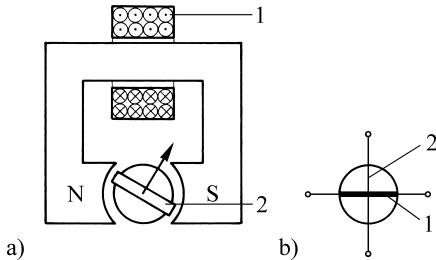


Bild 2.3 Elektrodynamisches Messwerk

- 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 Spannungspfad

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

$$B = \frac{\mu_0 N_1}{a} I_1. \quad (2.8)$$

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

$$M_e = \frac{\mu_0 A N_1 N_2}{a} I_1 I_2 \quad (2.9)$$

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

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

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

$$I_b = \frac{U_L}{R_i + R_b} \quad (2.11)$$

und mit dem Messgerät der Strom I_M

$$I_M = \frac{U_L}{R_i + R_b + R_M}. \quad (2.12)$$

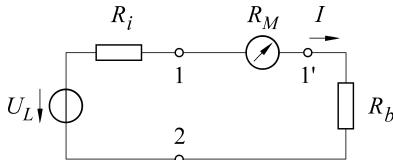


Bild 2.4 Zur Messung des über den Verbraucher R_b fließenden Stroms wird das Messgerät in Reihe zum Verbraucher angeschlossen

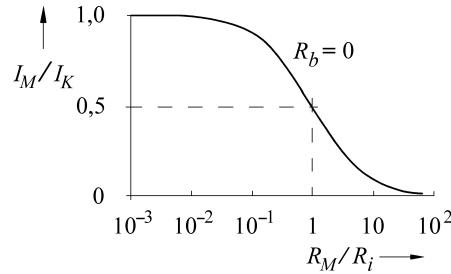


Bild 2.5 Um den Kurzschlussstrom I_K zu messen, muss der Widerstand R_M des Messgeräts klein sein gegenüber dem Innenwiderstand R_i der Quelle

Der wahre Wert I_b des Stroms wird nur dann angezeigt, wenn R_M gegenüber $R_i + R_b$ 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:

$$I_K = \frac{U_L}{R_i}, \quad (2.13)$$

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

$$I_M = \frac{U_L}{R_i + R_M}. \quad (2.14)$$

Das Verhältnis aus angezeigtem Strom und Kurzschlussstrom

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

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 Messwerkwiderstand 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

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

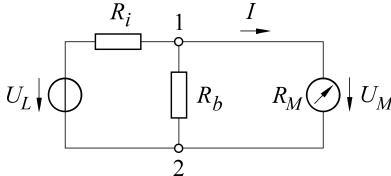


Bild 2.6 Zur Messung der an dem Verbraucher R_b abfallenden Spannung wird das Messgerät parallel zum Verbraucher angeschlossen

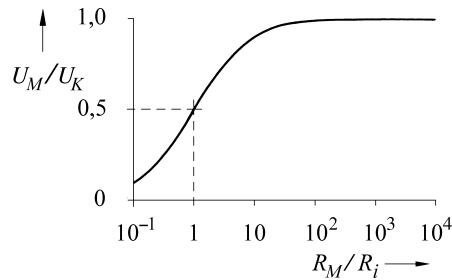


Bild 2.7 Um die Leerlaufspannung U_L zu messen, muss der Widerstand R_M des Messgeräts groß sein gegenüber dem Innenwiderstand R_i der Quelle

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:

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

$$I = I_M + I_p . \quad (2.19)$$

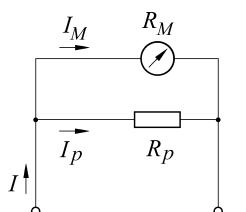


Bild 2.8 Erweiterung des Strommessbereichs durch einen Parallelwiderstand R_p

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

$$R_M I_M = R_p I_p = R_p (I - I_M) , \quad (2.20)$$

womit die Vorschrift zur Dimensionierung von R_p gewonnen ist:

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

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.

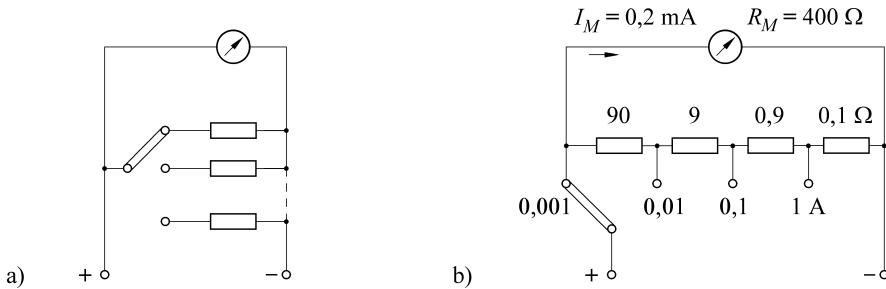


Bild 2.9 Umschaltung der Strommessbereiche bei einem Drehspulinstrument

- 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 100Ω durch die vier Widerstände 90Ω , 9Ω , $0,9\Omega$ und $0,1\Omega$ 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

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

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):

$$U = U_V + U_M = R_V I + (R_p \parallel R_M) I. \quad (2.23)$$

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

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

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

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

erforderlich.

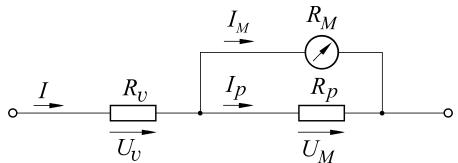


Bild 2.10 Erweiterung des Spannungsmessbereichs durch einen Vorwiderstand R_V

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 1000Ω erforderlich. Da jedoch für den 0,1-V-Messbereich schon 100Ω vorhanden sind, wird zusätzlich nur noch ein Widerstand von $1000 \Omega - 100 \Omega = 900 \Omega$ benötigt (Bild 2.11).

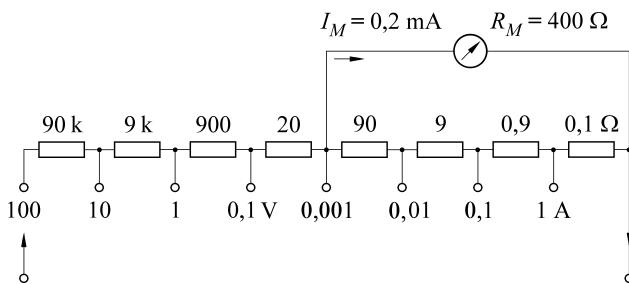


Bild 2.11 Drehspulinstrument mit umschaltbaren Strom- und Spannungsmessbereichen

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

Index

A

A/D-Umsetzer 282
-, Delta-Sigma-Umsetzer 294
-, direkt vergleichende 284
-, Flash- 287
- für mechanische Größen 306
- in Messgeräten 302
-, Kaskaden-Parallel- 287
-, Kenngrößen 297
- mit parallelen Komparatoren 73, 286
- mit sukzessiver Annäherung 288
-, Simultan- 287
-, u/f -Ladungsbilanz- 292
-, u/t -Zweirampen-Umsetzer 290
-, Wäge-Umsetzer 288
Abgleichbrücke 236
Ablaufsteuerung 411
Ablenkkoefizient 100
Absolutdruckmessung 223
Abtast- und Halteglied 282
Abtast- und Haltekreis 65
Abtastfrequenz 354, 362, 373
Abtasttheorem 298, 354
Addierverstärker 126
Aiken-Code 261
Amplituden- u. Phasengang 48
Amplitudengang 50, 356
Amplitudenspektrum 387
analoger Ausgabekanal 407
Anhängen von Nullen 359, 373
Anwenderprogramm 391
astabile Kippschaltung 313 f.
asynchrone Übertragung 393
Auflösungsvermögen 309
Aufnehmer 16, 74
-, chemischer 152
-, Differenzial-Widerstands- 227
-, elektrodynamischer 136
-, für ionisierende Strahlung 173
-, induktiver 240
-, kapazitiver 248
-, optischer 166
-, piezoelektrischer 158, 160
-, pyroelektrischer 158
-, Queranker 243

-, Tauchanker 241
-, thermischer 144
-, Widerstands- 196
Aufweckempfänger 427
Aufweckschaltung 427
Ausschlagbrücke 239
Auswerten 411
Autokorrelationsfunktion 388 f.
Autoleistungsdichtespektrum 387 ff.
Avogadro-Projekt 22

B

Bandbreite 65
Bartlett-Fenster 378
BCD-Zahlen 261
Bedienungsanforderung 399
Beschleunigungssensor 345
Biasstrom 131
Biegeschwinger 325
Binärkode 260
binäres Signal 259, 284
bistabile Kippstufe 264
Bit 260
Blackman-Fenster 381
Blindleistung 94
Braun'sche Röhre 99
Brückenschaltung 182 f.
Bussystem 391
Buszugriffsverfahren 392

C

Candela 28
CdS-Fotowiderstand 213
codierte Längen- und Winkelgeber 307
Counter 407

D

Dehnungsmessstreifen 216
Delta-Sigma-Umsetzer 294
Diagnose 384
Dichtemessung 347, 350
Dickenscherschwinger 325
Differenzdruckmessung 223

- Differenzial-Kondensator 240
 Differenzial-Transformator 136
 differentielle Nichtlinearität 297
 Differenzierglied 63
 digitaler Eingabe- und Ausgabekanal 407
 digitales Speicher-Oszilloskop 303
 Digital-Multimeter 302
 Digitaloszilloskop 303
 Diskrete Fouriertransformation DFT 352
 Diskrete Fouriertransformierte 389
 Diskriminator 286
 DMA-Kanal 406
 DMS 220
 Dokumentieren 412
 Doppelweggleichrichtung 90
 Drehmomentmessung 222
 Drehspulinstrument 80
 Drehstromsystem 96
 Drehzahllaufnehmer 137
 –, Induktions- 138
 Drehzahlmessung 277
 Dreieckfenster 378
 Druckmessdose 336
 Druckmessung 163, 218
 –, DMS 218
 – mit Schwingquarz 336
 –, piezoelektrisch 163
 D-Speicherglied 266
 dual slope converter 290
 duales Zahlensystem 259
 Duplex-Betrieb 393
 Durchflussmessung, Coriolis-
 Massendurchflussmesser 349
 –, Heißfilm 210
 –, Hitzdraht-Anemometer 210
 –, Induktions- 136, 142, 144
 –, magnetische 144
 –, thermischer Massenstrommesser 208
 –, Ultraschall- 336
 dynamisches Verhalten 48
- E**
- Echtzeitverarbeitung 408
 Effekt, AMR 215
 –, äußerer Foto- 167, 172
 –, CMR 216
 –, ferroelektrischer 203
 –, Gauß- 214
 –, GMR 216
 –, innerer Foto- 167 f.
 –, Josephson- 25
 –, magnetoelastischer 247
 –, magnetoresistiver 214
- , piezoelektrischer 158, 331
 –, piezoresistiver 223
 –, pyroelektrischer 159
 –, Seebeck- 144
 –, Sekundärelektronenemission 172
 –, Sperrsicht-Foto- 168
 –, thermoelektrischer 144
 –, thermomagentischer 211
 –, Thomson- 214
 –, Von-Klitzing- 26
 effektives Bit 300
 Effektivwert 91, 230
 Einfügen von Nullen 373
 Eintor-Resonator 333
 Einzelelektronen-Pumpe 27
 Elektrizitätszähler 98
 elektrodynamischer Schwingungsgeber 341
 elektrodynamisches Instrument 93
 elektrodynamisches Messwerk 81
 elektromagnetischer Schwingungsgeber 342
 elektromechanische Messgeräte 79
 Elektronenstrahl-Oszilloskop 99
 Elektronenstrahl-Röhre 99
 Elektrostriktion 158
 Empfindlichkeit 29
 Endlagenschalter 306
 Energie des elektrischen Feldes 255
 – des magnetischen Feldes 255
- F**
- f/u*-Umformung 279
 Fehler, absoluter 32
 –, bekannter 32
 –, dynamischer 65, 67, 203
 –, fehlerkorrigierender Code 261
 –, Korrektur 261
 –, Nullpunkt- 131
 –, Quantisierungs- 66, 274, 300
 –, relativer 32
 –, systematischer 32
 –, zufälliger 37
 Feldplatte 214 f.
 Fensterfunktion 375
 Feuchtemessung 211
 –, kapazitiver Geber 252
 –, LiCl-Geber 211
 FIFO 405
 Flächenscherschwinger 325
 Flammen-Ionisationsdetektor 175
 Formfaktor 89
 Fotodiode 168
 Fotoelement 168

Fotovervielfacher 166
 Fotowiderstand 213
 Fotozelle 166, 172
 Fourier-Transformation 351
 –, diskrete 359
 –, inverse diskrete 363, 373
 –, nicht zeitbegrenztes Signal 365
 –, periodisches Signal 368
 –, zeitbegrenztes Signal 355
 –, zeitdiskretes Signal 352
 –, zeitkontinuierliches Signal 351, 353
 Fouriertransformierte 388
 Frequenzgang 48, 50
 Frequenzkammgenerator 21
 frequenzkompensierter Spannungsteiler 102
 Frequenzmessung 66, 276 f.
 Frequenzsignal 273
 Frequenzumsetzer 313
 Füllstandsmessung, kapazitive 250 f.
 – mit Kaltleiter 207
 Füllstandswächter 207
 Fundamentalkonstanten 18
 Funkkommunikation 427

G

Gasanalyse, SnO₂-Sensor 212
 –, Wärmetönungsmessung 211
 Gatter 264
 Gegenkopplung 72, 111
 Gerätesteuerung 403
 Gleichrichtwert 88
 Gleichtaktunterdrückung 70, 111, 188
 Gleichtaktverstärkung 111
 Graetzschaltung 90
 grafische Entwicklungsumgebung 409
 Gray-Code 260
 Grenzfrequenz 48, 51
 Grenzwerteinheit 286
 Größengleichung 29

H

Halbleiter-Dehnungsmessstreifen 223
 Halbleiter-Strahlungsdetektor 176
 Hall-Generator 139
 Hall-Sonde 139
 Hamming-Fenster 380
 Handshake-Signal 392
 Hardware 390
 Hardwareschnittstelle 392
 Hauptzipfel 376
 Heißleiter 30, 201
 Hitzdraht-Anemometer 208
 Hochpass 63

I

i/i-Verstärker 108, 121
i/u-Verstärker 108, 119
 Impedanzwandler 124
 Impulsantwort 48, 53, 55, 62
 Impulsratenmessung 276, 279
 Induktionsdrehzahlgeber 137
 induktiver Aufnehmer 240 f., 246, 258
 induktiver Schleifendetektor 246
 Induktivitätsmessung 230
 Infrarot-Sensor 164
 inkrementaler Längen- und Winkelgeber 308
 Instrumentieren 409
 integrale Nichtlinearität 298
 Integrationsverstärker 315
 Integrierglied 64
 Interferometer 311
 invertierender Verstärker 331
 Ionisationskammer 173
 isosynchrone Übertragung 393

J

JK-Speicherglied 267
 Josephson-Effekt 25

K

Kalibrieren 410
 Kaltleiter 203
 Kapazitätsmessung 230
 kapazitive Füllstandsmessung 250 f.
 kapazitiver Aufnehmer 248
 Kelvin 28
 Kennlinie 29
 Kettenstruktur 69
 Kippschaltung 313, 316
 Komparator 284
 Kompensationsdose 149
 Konstantspannungsquelle 123
 Konstantstromquelle 123, 180
 Kraftmessung, Kraftmessdose mit DMS 222
 –, magnetoelastische Kraftmessdose 247
 –, piezoelektrischer Aufnehmer 65
 –, Schwingsaiten-Aufnehmer 346
 Kreisstruktur 72
 Kreuzkorrelationsfunktion 388
 Kreuzleistungsdichtespektrum 387 f.
 Kurzschlussring-Sensor 245

L

LabVIEW 413
 ladungsempfindlicher Verstärker 130
 Ladungsverstärker 162

- Lambda-Sonde 156
 Längen- und Winkelmessung, codierte Geber 312
 –, Dehnungsmessstreifen 216
 –, inkrementaler Geber 308
 –, Interferometer 311
 –, Kurzschlussring-Sensor 245
 –, Magnetschranke 141
 –, Queranker-Aufnehmer 243
 –, Schwingsaiten-Aufnehmer 346
 –, Tauchanker-Aufnehmer 241
 –, Widerstandsferngeber 196
 Längsschwinger 325
 LC-Oszillator 319
 Leerlaufspannung 32, 82 f.
 Leistungsmessung bei Drehstrom 96
 – bei Gleichspannung 92
 – bei Wechselspannung 94
 – im Zeit- und Frequenzbereich 385
 lichtempfindlicher Widerstand 213
 Lichtmessung, Fotodiode 166
 –, Fotoelement 166
 –, Fotovervielfacher 166
 –, Fotowiderstand 213
 –, Fotozelle 166
 –, Tabelle 167
 logarithmierender Verstärker 130
 Luftmassenmesser 210
- M**
- Magnetfeldmessung, Induktionsaufnehmer 137
 magnetische Feldkonstante 241
 Mantel-Thermoelement 48
 Massenstrommesser 350
 MATLAB/SIMULINK 418
 maximaler Abtastfehler 376
 mechanische Schwingungen 339
 Messbereichsbegrenzung 87
 Messbereichserweiterung 84
 Messeinrichtung 16
 Messgeräte, statisches Verhalten 29
 Messkette 69
 Messsystem, energieautarkes 423
 –, funkabfragbares 423
 Messverstärker 107, 193
 Messwertaufzeichnung 410
 Messzeit 373
 Metalloxid-Gassensor 212
 Mikrokanalplatte 173
 Mitkopplung 72
 Moiré-Streifen 311
 Mol 28
 monostabile Kippstufe 280, 349
- Monotoniefehler 298
 Multiplexer 282, 405
 Multiplizierer, Hall-Multiplizierer 141
 –, Parabel-Multiplizierer 127
 Multivibrator 313
- N**
- Naturkonstanten 17
 nichtinvertierender Verstärker 112
 Normalverteilung 34
 NTC-Widerstand 48
 Nullpunktunterdrückung 188
- O**
- Oberflächenwelle 331
 off-line-Verarbeitung 408
 Offset 131, 192, 315
 Offsetspannung 192
 OFW-Sensor 331
 on-line-Verarbeitung 408
 Operationsverstärker 110, 115, 131, 135
 –, Tabelle 116
 optische Aufnehmer 166
 Oszillator, harmonischer 318
 –, LC- 319
 –, Quarz- 277
 –, RC- 322
 –, Relaxations- 200
 Oszilloskop, analoges 101
 –, digitales 303
- P**
- Parallelregister 269
 Parallelstruktur 70, 188
 Parametrieren 409
 Parseval'sches Theorem 385
 Parseval-Theorem 388 f.
 Periodendauermessung 274
 Phasengang 50
 Phasenmessung, digital 276
 –, gesteuerter Gleichrichter 233
 Phasenregelung 338
 Phasenschieber-Brücke 239
 Phasenwinkelmessung 233, 275
 pH-Messkette 153
 piezoelektrischer Aufnehmer 160
 piezoelektrischer Effekt 331
 piezoelektrischer Resonator 324
 piezoelektrischer Schallgeber 336
 piezoresistiver Effekt 223
 Platin-Messwiderstand 199
 Plug-and-Play 397
 Positionsmessung 141, 170

Protokoll 392
 PTC-Widerstand 203
 Pulsweitenmodulation 407
 PVDF 159
 pyroelektrischer Effekt 159
 pyroelektrischer Sensor 164

Q

Quanten-Hall-Effekt 26
 Quantisierungsfehler 274, 300
 Quantisierungsräuschen 300, 302
 Quarz 324
 Quarzoszillator 330
 Queranker-Aufnehmer 243, 245

R

radizierender Verstärker 129
 Rauschen 135
 RC-Oszillator 322
 RC-Spannungsteiler 103
 RC-Tiefpass 52, 279 f.
 Rechteckfenster 377
 Register 269
 Reifendruckmessung 336
 Relaxationsoszillator 313
 Remote Sensing 335
 reziproker piezoelektrischer Effekt 158
 RS-Speicherglied 264 f.
 Rückwirkung 31, 103

S

Sägezahngenerator 104
 SAW surface acoustic wave 331
 Schadensfrüherkennung 384
 Schieberegister 270 f.
 Schnittstelle 391
 Schnittstellennachricht 400
 Schwingbeschleunigung 340
 Schwinggeschwindigkeit 340
 Schwingkreis 235
 Schwingquarz, Frequenznormal 324
 –, Temperaturföhrer 331
 Schwingsaiten-Frequenzumsetzer 346
 Schwingungsmessung 313
 –, absolute 343
 –, relative 340
 Schwingweg 340
 SCPI 403
 Seebeck-Effekt 144
 seismischer Aufnehmer 340, 344
 Sensor, Beschleunigungs- 345
 –, Differenzial-Widerstands- 227
 –, Druck- 345

–, Foto- 170
 –, funkabfragbarer 334, 423
 –, Gas- 212
 –, Hall- 141
 –, induktiver 240, 258
 –, Infrarot- 164
 –, integrierter 78
 –, kapazitiver 240, 248
 –, Kurzschlussring- 245
 –, magnetoresistiver 215
 –, NTC- 48
 –, OFW-Laufzeit- 333
 –, ohmscher 178
 –, optischer 166
 –, optoelektronischer 167
 –, OWF-Laufzeit 331
 –, piezoelektrischer 158
 –, pyroelektrischer 158
 –, Sauerstoff- 155
 –, Schwingungs- 350
 –, Silizium- 205
 –, SnO₂- 212
 –, Taguchi- 212
 –, Temperatur- 151
 –, thermischer 144
 –, Widerstands- 196
 sensornah Signalverarbeitung 77
 SI-Einheiten 18
 Sigma-Delta-Umsetzer 296
 Signal/Rausch-Verhältnis 297, 300
 Sinusantwort 48, 50
 Sinus-Spektrum 370 f.
 SI-System 18
 Software 391
 Softwareschnittstelle 391
 Solarzelle 423
 Spannung/Frequenz-Umsetzer 290
 Spannung/Zeit-Umsetzer 290
 Spannungsfolger 124
 Spannungsmessung 83
 –, A/D-Umsetzer 282
 –, Anzeigegerät 80, 85, 302
 –, Josephson-Effekt 25
 –, Modulations- 193
 –, Nullpunktfehler 132
 –, Offsetgrößen 131 f., 192
 –, Oszilloskop 103
 –, Verstärker 112
 Spektralanalyse 351
 Sperrsicht-Fotoeffekt 168
 Sperrsicht-Temperatursensor 151
 Spinventil 216
 Spitzenwert-Gleichrichtung 90
 spreading resistance sensor 205

Sprungantwort 48, 61
 SrTiO₃-Sensor 212
 Standard Commands for Programmable Instruments 403
 Standardabweichung 34
 Statusabfrage 399
 Stichprobe 36
 Stimmgabel-Frequenzumsetzer 347
 Strahlungsdetektor, Halbleiter-Detektor 173
 –, Ionisationskammer 173
 Stromgenerator 109
 Strommessung 82
 –, Anzeigegerät 82
 –, Hallsonde 140
 –, Nullpunktfehler 133
 –, Offsetgrößen 133
 –, Verstärker 107
 Student'sche t -Verteilung 41
 Subtrahierverstärker 126, 189
 Superposition 132
 Systemprogramm 391
 Szintillationsmesskopf 173

T

t/u -Umformung 279
 Tastteiler 103
 Tauchanker-Aufnehmer 241
 Temperaturkoeffizient 197 f., 201
 Temperaturmessung, berührungslose 165
 –, Berührungsthermometer 206
 –, Heißleiter 201
 –, integrierter Sensor 151
 –, Kaltleiter 203
 –, Quarz 331
 –, spreading resistance sensor 205
 –, Tabelle 206
 –, Thermoelement 144
 –, verfahrenstechnische Größen 207
 –, Widerstandsthermometer 197
 Thermistor 201
 thermoelektrischer Effekt 144
 Thermoelement 144, 149
 Thermoumformer 91
 Thomson-Messbrücke 183
 Tiefpass 50, 64
 Timer 406
 Torzeit 276
 Trägerfrequenz-Brücke 193
 Transientenrecorder 304
 Treiber 391
 Triggerung 278
 T-Speicherriegel 267
 Turkey-Fenster 382

U

u/i -Verstärker 108
 u/u -Verstärker 108
 UART-Controller 394
 Übergangsfunktion 48
 Übertragungsfaktor 30, 49
 Uhr, Caesium 20
 –, optisch 21
 Ultraschall-Durchflussmesser 336
 Ultraschallwandler 336
 Universalzähler 277
 Univibrator 279
 Unsicherheit 42

V

V-Abtastung 308
 Varianz 34
 Vergleichsstelle 149
 Verhältnisbildung 71
 Verlustwinkel 229
 Verstärker, Elektrometer- 190
 – für Brückenschaltungen 189
 –, Lock-in- 194
 –, Nullpunktfehler 131
 –, Offsetgrößen 131
 –, Operations- 110
 –, Spannung 108
 –, Spannungsverstärker 112
 –, Strom 108, 119, 121
 –, Trägerfrequenz- 194
 –, Wechselspannungs- 194
 Vertrauensbereich 36
 Verzögerungsglied 1. Ordnung 48
 – 2. Ordnung 56
 virtuelles Messgerät 412
 Volt 25
 Von-Hann-Fenster 379
 Von-Klitzing-Effekt 26

W

Wäge-Umsetzer 288
 Wandler, magnetischer 425
 –, solarer 423
 –, thermischer 424
 Wattwaage 22
 Wechselstrom-Gleichstrom-Komparator 92
 Weg- und Winkelmessung 136
 Wheatstone-Messbrücke 182
 Widerstandsauftnehmer 178
 Widerstandsmessung 178, 181, 185, 200
 Widerstandstemperaturfühler 197
 Widerstandsthermometer 197
 Wiener-Chintschin-Theorem 387

Z

Zahlenwertgleichung 29
Zähler 268
Zeitbasis 276
Zeitintervallmessung 274, 279

Zeitmessung 273 f.
Zenerdiode 86 f., 123
zero padding 360
Ziffernanzeige 262
Zweirampen-A/D-Umsetzer 290
Zwei-Tor-Resonator 332