

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	Die neuen SI-Einheiten	20
1.2.4	Definition und Darstellung der Sekunde	21
1.2.5	Definition und Darstellung des Meters	23
1.2.6	Definition und Darstellung des Kilogramms	23
1.2.7	Definition und Darstellung der elektrischen Einheiten	25
1.2.8	Die SI-Einheiten der Temperatur, der Stoffmenge und der Lichtstärke	28
1.2.9	Größen- und Zahlenwertgleichungen	30
1.3	Statisches Verhalten der Messgeräte; Kennlinie und Empfindlichkeit	31
1.4	Messfehler und Messunsicherheiten	32
1.4.1	Bekannte Einflüsse; Korrektur des bekannten Messfehlers	33
1.4.2	Unbekannte, normalverteilte Unsicherheiten; eine einzige Messgröße X	35
1.4.3	Unbekannte, normalverteilte Unsicherheiten; verknüpfte Messgrößen $Y = f(X_i)$	39
1.4.4	Student'sche t -Verteilung	43
1.4.5	Unbekannte, systematische Unsicherheiten	43
1.4.6	Korrelierte Messgrößen	44
1.4.7	Zusammenfassung	48
1.5	Dynamisches Verhalten der Messgeräte	49
1.5.1	Verzögerungsglied 1. Ordnung	50
1.5.2	Verzögerungsglied 2. Ordnung	57
1.5.3	Weitere Beispiele für das Zeitverhalten	65
1.6	Dynamische Messfehler	67
1.6.1	Fehlermöglichkeiten	67
1.6.2	Korrektur des dynamischen Fehlers	69
1.7	Strukturen von Messeinrichtungen	71
1.7.1	Kettenstruktur	71
1.7.2	Parallelstruktur	72
1.7.3	Kreisstruktur	74
1.8	Die informationstragenden Parameter der Messsignale	75
1.9	Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen	78
1.9.1	Physikalische Effekte zum elektrischen Messen nichtelektrischer Größen	78
1.9.2	Sensornahe Signalverarbeitung	78

2	Messung von Strom und Spannung; spannungs- und stromliefernde Aufnehmer	81
2.1	Elektromechanische Messgeräte und ihre Anwendung	81
2.1.1	Messwerke	81
2.1.2	Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	84
2.1.3	Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	90
2.1.4	Messung der Leistung	95
2.1.5	Messung der elektrischen Arbeit	100
2.2	Elektronenstrahl-Oszilloskop	101
2.2.1	Elektronenstrahl-Röhre	101
2.2.2	Baugruppen	103
2.2.3	Betriebsarten des Elektronenstrahl-Oszilloskops	108
2.3	Messverstärker	109
2.3.1	Einführung	109
2.3.2	Nicht invertierender Spannungsverstärker	116
2.3.3	Invertierender Stromverstärker	122
2.3.4	Anwendungen des Spannungsverstärkers	127
2.3.5	Anwendungen des Stromverstärkers	129
2.3.6	Nullpunktfehler des realen Operationsverstärkers	134
2.4	Elektrodynamische spannungsliefernde Aufnehmer	139
2.4.1	Weg- und Winkelmessung	140
2.4.2	Drehzahlaufnehmer – Generatoren	141
2.4.3	Hall-Sonde	142
2.4.4	Induktions-Durchflussmesser	146
2.5	Thermische spannungsliefernde Aufnehmer	148
2.5.1	Thermoelement	148
2.5.2	Integrierter Sperrschicht-Temperatur-Sensor	155
2.6	Chemische spannungsliefernde Aufnehmer und Sensoren	156
2.6.1	Galvanisches Element	156
2.6.2	pH-Messkette mit Glaselektrode	156
2.6.3	Sauerstoffmessung mit Festkörper-Ionenleiter	159
2.7	Piezo- und pyroelektrische ladungsliefernde Aufnehmer	161
2.7.1	Wirkungsweise und Werkstoffe	161
2.7.2	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	164
2.7.3	Pyroelektrischer Infrarot-Sensor	167
2.8	Optische Aufnehmer und Sensoren	169
2.8.1	Fotoelement und Fotodiode	171
2.8.2	Fotosensoren für Positionsmessungen und zur Bilderzeugung	174
2.8.3	Fotozelle	175
2.8.4	Fotovervielfacher und Mikrokanalplatte	176
2.9	Aufnehmer für ionisierende Strahlung	177
2.9.1	Ionisationskammer	177
2.9.2	Halbleiter-Strahlungsdetektor	179

3

Messung von ohmschen Widerständen;

Widerstandsaufnehmer	182
3.1 Strom- und Spannungsmessung	182
3.1.1 Gleichzeitige Messung von Spannung und Strom	182
3.1.2 Vergleich mit einem Referenzwiderstand	183
3.2 Anwendung einer Konstantstromquelle	184
3.3 Brückenschaltungen	186
3.3.1 Abgleich-Widerstandsmessbrücke	186
3.3.2 Ausschlag-Widerstandsmessbrücke	188
3.4 Verstärker für Brückenschaltungen	193
3.4.1 Subtrahierer mit invertierendem Verstärker	193
3.4.2 Subtrahierer mit Elektrometer-Verstärkern	194
3.4.3 Trägerfrequenz-Brücke und -Messverstärker	197
3.5 Widerstandsaufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	200
3.6 Widerstandstemperaturfühler	201
3.6.1 Metall-Widerstandsthermometer	201
3.6.2 Heißleiter	205
3.6.3 Kaltleiter	207
3.6.4 Silizium-Widerstandstemperatursensor	209
3.6.5 Fehlermöglichkeiten bei der Anwendung von elektrischen Berührungsthermometern	210
3.7 Ermittlung verfahrenstechnischer Größen durch Temperaturmessungen	211
3.7.1 Füllstandswächter	211
3.7.2 Thermischer Massenstrommesser	212
3.7.3 Messung der Luftfeuchte; Messung von Gaskonzentrationen	215
3.8 Gassensoren mit halbleitenden Metalloxiden	216
3.9 Lichtempfindlicher Widerstand	217
3.10 Magnetisch steuerbarer Widerstand	218
3.10.1 Feldplatte	218
3.10.2 Anisotroper magnetoresistiver Effekt (AMR)	219
3.10.3 Spinventil, Riesenmagnetowiderstand und kolossaler Magnetowiderstand	220
3.11 Dehnungsmessstreifen	220
3.11.1 Prinzip	220
3.11.2 Metall-Dehnungsmessstreifen	221
3.11.3 Störgrößen	223
3.11.4 Anwendung der DMS zur Spannungsanalyse	224
3.11.5 Halbleiter-Dehnungsmessstreifen	227
3.12 Linearisieren der Widerstandsaufnehmer-Kennlinien	228
3.12.1 Linearisieren durch einen Vor- und/oder Parallelwiderstand	229
3.12.2 Messung der Spannungsdifferenz bei Differenzial-Widerstandsaufnehmern	231
3.12.3 Differenzial-Widerstandsaufnehmer in einer Halbbrücke	232

4

Messung von Blind- und Scheinwiderständen; induktive und kapazitive Aufnehmer	233
4.1 Strom- und Spannungsmessung	234
4.1.1 Messung der Effektivwerte	234
4.1.2 Vergleich mit Referenzelement	235
4.1.3 Getrennte Ermittlung des Blind- und Wirkwiderstandes	236
4.1.4 Messung eines Phasenwinkels	237
4.1.5 Strommessung in einem fremderregten Schwingkreis	239
4.2 Wechselstrom-Abgleichbrücke	240
4.2.1 Prinzip	240
4.2.2 Kapazität-Messbrücke nach Wien	241
4.2.3 Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell	242
4.2.4 Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell-Wien	242
4.2.5 Phasenschieber-Brücke	243
4.3 Wechselspannungs-Ausschlagbrücke	243
4.4 Induktive Aufnehmer	244
4.4.1 Tauchanker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	245
4.4.2 Queranker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	247
4.4.3 Kurzschlussring-Sensor	249
4.4.4 Anwendung der induktiven Längen- und Winkelgeber	249
4.4.5 Induktiver Schleifendetektor zur Erfassung von Fahrzeugen	250
4.4.6 Magnetoelastische Kraftmessdose	251
4.5 Kapazitive Aufnehmer	252
4.5.1 Änderung des Plattenabstands	252
4.5.2 Änderung der Plattenfläche	253
4.5.3 Geometrische Änderung des Dielektrikums	254
4.5.4 Änderung der Permittivitätszahl durch Feuchtigkeit oder Temperatur	256
4.6 Einsatz der induktiven und kapazitiven Abgriffe in Differenzdruck-Messumformern	256
4.7 Vergleich der induktiven und der kapazitiven Längenaufnehmer	258
4.7.1 Energie des magnetischen und des elektrischen Feldes	259
4.7.2 GröÙte der Brückenschaltung entnehmbare Leistung	260
4.7.3 Steuerleistung zum Verstellen der Aufnehmer	261

5

Digitale Grundsaltungen; Zeit- und Frequenzmesstechnik	263
5.1 Darstellung, Anzeige und Ausgabe numerischer Messwerte	263
5.1.1 Duales Zahlensystem	263
5.1.2 Binärcodes für Dezimalzahlen	264
5.1.3 Ziffernanzeige; Vergleich mit Skalenanzeige	266
5.1.4 Umsetzung eines digitalen Signals in eine Spannung; Digital/Analog-Umsetzer; digital steuerbare Spannungsquelle	266
5.2 Bistabile Kippstufen	268
5.2.1 Asynchrones RS-Speicherglied	268
5.2.2 Taktgesteuertes RS-Speicherglied	269
5.2.3 Taktflankengesteuertes D-Speicherglied	270

5.2.4	Taktflankengesteuertes JK -Speicherglied	271
5.2.5	Taktflankengesteuertes T -Speicherglied	271
5.3	Zähler	272
5.4	Register	273
5.4.1	Parallelregister	273
5.4.2	Schieberegister zur Parallel/Serien-Umsetzung	274
5.4.3	Schieberegister zur Serien/Parallel-Umsetzung	275
5.4.4	Multiplexer als Parallel/Serien-Umsetzer	276
5.5	Digitale Zeitmessung	277
5.5.1	Einführung	277
5.5.2	Digitale Messung eines Zeitintervalls	278
5.5.3	Messung einer Periodendauer	278
5.5.4	Messung eines Phasenwinkels	279
5.6	Digitale Frequenzmessung	280
5.6.1	Digitale Messung einer Frequenz oder einer Impulsrate	280
5.6.2	Messung des Verhältnisses zweier Frequenzen oder Drehzahlen ..	281
5.6.3	Messung der Differenz zweier Frequenzen oder Drehzahlen	281
5.6.4	Universalzähler	281
5.7	Analoge Messung eines Zeitintervalls oder einer Frequenz	283
5.7.1	Analoge Messung eines Zeitintervalls; t/u -Umformung	283
5.7.2	Analoge Messung einer Frequenz oder Impulsrate; f/u -Umformung	283

6 Analog/Digital-Umsetzer für elektrische und mechanische Größen 286

6.1	Abtast- und Halteglied	286
6.2	Direkt vergleichende A/D-Umsetzer	288
6.2.1	Komparator	288
6.2.2	Komparator mit Hysterese	289
6.2.3	A/D-Umsetzer mit parallelen Komparatoren	290
6.2.4	Kaskaden-Parallel-Umsetzer	291
6.2.5	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Annäherung an den Messwert	292
6.3	Spannung/Zeit- und Spannung/Frequenz-Umsetzer	294
6.3.1	u/t -Zweirampen-Umsetzer	294
6.3.2	u/f -Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren	296
6.3.3	Delta-Sigma-Umsetzer	298
6.4	Kenngrößen der Analog/Digital-Umsetzer	301
6.4.1	Kennlinie	301
6.4.2	Abtasttheorem	302
6.4.3	Umsetzrate und Auflösung	303
6.4.4	Quantisierungsrauschen, Zahl der effektiven Bit	304
6.5	Analog/Digital-Umsetzer in Messgeräten	306
6.5.1	Digital-Multimeter	306
6.5.2	Digitales Speicher-Oszilloskop	307
6.6	A/D-Umsetzer für mechanische Größen	310
6.6.1	Endlagenschalter	310
6.6.2	Codierte Längen- und Winkelgeber	311

6.6.3	Inkrementale Längen- und Winkelgeber	312
6.6.4	Vergleich der codierten und inkrementalen Längengeber	316

7 Schwingungsmessungen **317**

7.1	Astabile Kippschaltungen als Frequenzumsetzer	317
7.1.1	Kippschaltung mit Verstärker und Komparator	317
7.1.2	Kippschaltung mit stabilisierten Hilfsspannungen	320
7.2	Harmonische Oszillatoren	322
7.2.1	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen, Prinzip	322
7.2.2	LC-Oszillator	323
7.2.3	RC-Oszillator	326
7.3	Piezoelektrische Resonatoren	328
7.3.1	Volumenschwingende Quarze	328
7.3.2	Oberflächenwellen OFW in Quarzen	335
7.3.3	Funkabfragbare Sensoren	338
7.3.4	Ultraschall-Durchflussmesser	340
7.4	Mechanische Schwingungen	343
7.4.1	Charakteristische Größen	343
7.4.2	Relative Schwingungsmessung	344
7.4.3	Absolute Schwingungsmessung	346
7.4.4	Monolithisch integrierter Beschleunigungssensor	349
7.4.5	Stimmgabel-Frequenzumsetzer	350
7.4.6	Coriolis-Massendurchflussmesser	351

8 Spektralanalyse **354**

8.1	Aufgabenstellung	354
8.2	FTC eines zeitkontinuierlichen Signals	354
8.3	FTD eines zeitdiskreten Signals	355
8.3.1	Übergang vom zeitkontinuierlichen zum zeitdiskreten Signal	355
8.3.2	Unterschiede bei der Transformation eines zeitkontinuierlichen und eines zeitdiskreten Signals	356
8.3.3	Abtasttheorem	357
8.4	DFT eines abgetasteten, zeitbegrenzten Signals	358
8.4.1	Datensatz mit endlich vielen Werten; diskrete Spektralfunktion ..	358
8.4.2	Zusammenhang zwischen FTD und DFT; Anhängen von Nullen ..	362
8.4.3	Wahl der Abtastfrequenz	365
8.4.4	Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT	366
8.5	DFT eines abgetasteten, nicht zeitbegrenzten Signals	368
8.5.1	Konstantes Signal	368
8.5.2	Periodisches Signal	371
8.5.3	Anhängen von Nullen, Abtastfrequenz und Messzeit	376
8.5.4	Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT	376
8.6	Fensterfunktionen	378
8.6.1	Kriterien zur Beurteilung	378
8.6.2	Fensterfunktionen und ihre Spektren	379
8.6.3	Fensterung bei transienten Signalen	386

8.7	Anwendungen der DFT	387
8.8	Leistungsmessung im Zeit- und Frequenzbereich	388

9 Rechnerunterstützte Messsysteme 393

9.1	Bussysteme	393
9.1.1	Kenngrößen von Bussystemen	393
9.1.2	Universal Serial Bus USB	395
9.2	Steuerung eines Messaufbaus	395
9.2.1	Gerätesteuerung	396
9.2.2	Aufgaben der Messprogramme	397
9.2.3	Ablauf eines rechnergestützten Messprozesses	398
9.2.4	Virtuelles Messgerät	404
9.2.5	Steuerung eines Messaufbaus mit LabVIEW	405
9.3	Eingebettetes System	410
9.3.1	Mikrocontroller	411
9.3.2	Programmierung von Mikrocontrollern	414

Literatur 419

Index 427