

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	17
1.1 Umfang und Bedeutung der elektrischen Messtechnik	17
1.2 Maßeinheiten	19
1.2.1 Internationales Einheitensystem, SI-Einheiten	20
1.2.2 Einheiten und Fundamentalkonstanten	23
1.2.3 Darstellung der mechanischen Grundeinheiten	25
1.2.4 Darstellung, Reproduzierung, Bewahrung und Weitergabe der elektrischen Einheiten	26
1.2.5 Rückführbarkeit; Deutscher Kalibrierdienst	29
1.2.6 Größen- und Zahlenwertgleichungen	30
1.3 Statisches Verhalten der Messgeräte	31
1.4 Statische Messfehler und Messunsicherheiten	33
1.4.1 Einführung	33
1.4.2 Bekannte Einflüsse; systematische Messfehler	34
1.4.3 Unbekannte Einflüsse; Messunsicherheit	36
1.5 Dynamisches Verhalten der Messgeräte	51
1.5.1 Verzögerungsglied 1. Ordnung	52
1.5.2 Verzögerungsglied 2. Ordnung	60
1.5.3 Weitere Beispiele für das Zeitverhalten	69
1.6 Dynamische Messfehler	71
1.6.1 Fehlermöglichkeiten	71
1.6.2 Korrektur des dynamischen Fehlers	74
1.7 Strukturen von Messeinrichtungen	76
1.7.1 Kettenstruktur	76
1.7.2 Parallelstruktur	77
1.7.3 Kreisstruktur	80
1.8 Die informationstragenden Parameter der Messsignale	81

1.9	Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen	84
1.9.1	Physikalische Effekte zum elektrischen Messen nichtelektrischer Größen	84
1.9.2	Sensornahe Signalverarbeitung	85
2	Messung von Strom und Spannung; spannungs- und stromliefernde Aufnehmer	86
2.1	Elektromechanische Messgeräte und ihre Anwendung	86
2.1.1	Messwerke	86
2.1.2	Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	92
2.1.3	Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	99
2.1.4	Messung der Leistung	105
2.1.5	Messung der elektrischen Arbeit	112
2.1.6	Registrierende Messgeräte	113
2.2	Elektronenstrahl-Oszilloskop	116
2.2.1	Elektronenstrahl-Röhre	116
2.2.2	Baugruppen	119
2.2.3	Spezial-Oszilloskope	124
2.2.4	Betriebsarten des Elektronenstrahl-Oszilloskops	125
2.3	Messverstärker	127
2.3.1	Einführung	127
2.3.2	Nicht invertierender Spannungsverstärker	133
2.3.3	Invertierender Stromverstärker	140
2.3.4	Anwendungen des Spannungsverstärkers	146
2.3.5	Anwendungen des Stromverstärkers	148
2.3.6	Nullpunktfehler des realen Operationsverstärkers	154
2.4	Elektrodynamische spannungsliefernde Aufnehmer	160
2.4.1	Weg- und Winkelmessung	161
2.4.2	Analoge Drehzahlmessung	161
2.4.3	Hall-Sonde	162
2.4.4	Induktions-Durchflussmesser	166
2.5	Thermische spannungsliefernde Aufnehmer	168

2.5.1	Thermoelement	168
2.5.2	Integrierter Sperrschicht-Temperatur-Sensor	176
2.6	Chemische spannungsliefernde Aufnehmer und Sensoren	177
2.6.1	Galvanisches Element	177
2.6.2	pH-Messkette mit Glaselektrode	178
2.6.3	Sauerstoffmessung mit Festkörper-Ionenleiter	180
2.7	Piezo- und pyroelektrische ladungsliefernde Aufnehmer	183
2.7.1	Wirkungsweise und Werkstoffe	183
2.7.2	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	186
2.7.3	Pyroelektrischer Infrarot-Sensor	191
2.8	Optische Aufnehmer und Sensoren	194
2.8.1	Fotoelement und Fotodiode	196
2.8.2	Fotosensoren für Positionsmessungen und zur Bilderzeugung	198
2.8.3	Fotozelle	200
2.8.4	Fotovervielfacher	201
2.9	Aufnehmer für ionisierende Strahlung	202
2.9.1	Ionisationskammer	202
2.9.2	Auslöse-Zählrohr	204
2.9.3	Halbleiter-Strahlungsdetektor	206
3	Messung von ohmschen Widerständen; Widerstandsaufnehmer	208
3.1	Strom- und Spannungsmessung	208
3.1.1	Gleichzeitige Messung von Spannung und Strom	208
3.1.2	Vergleich mit einem Referenzwiderstand	209
3.2	Anwendung einer Konstantstromquelle	210
3.3	Brückenschaltungen	215
3.3.1	Abgleich-Widerstandsmessbrücke	215
3.3.2	Ausschlag-Widerstandsmessbrücke	217
3.4	Verstärker für Brückenschaltungen	223
3.4.1	Subtrahierer mit invertierendem Verstärker	223
3.4.2	Subtrahierer mit Elektrometer-Verstärkern	224
3.4.3	Trägerfrequenz-Brücke und -Messverstärker	226

3.5	Widerstandsaufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	230
3.6	Widerstandstemperaturfühler	231
3.6.1	Metall-Widerstandsthermometer	231
3.6.2	Heißleiter	236
3.6.3	Kaltleiter	238
3.6.4	Silizium-Widerstandstemperatursensor	240
3.6.5	Fehlermöglichkeiten bei der Anwendung von elektrischen Berührungsthermometern	241
3.7	Ermittlung verfahrenstechnischer Größen durch Temperaturmessungen	243
3.7.1	Füllstandswächter	243
3.7.2	Thermischer Massenstrommesser	244
3.7.3	Messung der Luftfeuchte; Messung von Gaskonzentrationen . .	246
3.8	Gassensoren mit halbleitenden Metalloxiden	247
3.9	Lichtempfindlicher Widerstand	249
3.10	Magnetisch steuerbarer Widerstand	250
3.11	Dehnungsmessstreifen	251
3.11.1	Prinzip	251
3.11.2	Metall-Dehnungsmessstreifen	253
3.11.3	Störgrößen	255
3.11.4	Anwendung der DMS zur Spannungsanalyse	255
3.11.5	Halbleiter-Dehnungsmessstreifen	259
3.12	Linearisieren der Widerstandsaufnehmer-Kennlinien	260
3.12.1	Linearisieren durch einen Vor- und/oder Parallelwiderstand . .	261
3.12.2	Messung der Spannungsdifferenz bei Differenzial- Widerstandsaufnehmern	264
3.12.3	Differenzial-Widerstandsaufnehmer in einer Halbbrücke	265
4	Messung von Blind- und Scheinwiderständen; induktive und kapazi- tative Aufnehmer	266
4.1	Strom- und Spannungsmessung	267
4.1.1	Messung der Effektivwerte	267
4.1.2	Vergleich mit Referenzelement	268
4.1.3	Getrennte Ermittlung des Blind- und Wirkwiderstandes	269

4.1.4	Messung eines Phasenwinkels	271
4.1.5	Strommessung in einem fremderregten Schwingkreis	272
4.2	Wechselstrom-Abgleichbrücke	273
4.2.1	Prinzip	273
4.2.2	Kapazität-Messbrücke nach Wien	275
4.2.3	Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell	276
4.2.4	Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell-Wien	276
4.2.5	Phasenschieber-Brücke	277
4.3	Wechselspannungs-Ausschlagbrücke	277
4.4	Induktive Aufnehmer	279
4.4.1	Tauchanker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	279
4.4.2	Queranker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	282
4.4.3	Kurzschlussring-Sensor	284
4.4.4	Anwendung der induktiven Längen- und Winkelgeber	284
4.4.5	Induktiver Schleifendetektor zur Erfassung von Fahrzeugen	286
4.4.6	Magnetoelastische Kraftmessdose	286
4.5	Kapazitive Aufnehmer	287
4.5.1	Änderung des Plattenabstands	287
4.5.2	Änderung der Plattenfläche	289
4.5.3	Geometrische Änderung des Dielektrikums	290
4.5.4	Änderung der Permittivitätszahl durch Feuchtigkeit oder Temperatur	292
4.6	Einsatz der induktiven und kapazitiven Abgriffe in Differenzdruck- Messumformern	292
4.7	Vergleich der induktiven und der kapazitiven Längenaufnehmer	295
4.7.1	Energie des magnetischen und des elektrischen Feldes	296
4.7.2	Größe der Brückenschaltung entnehmbare Leistung	297
4.7.3	Steuerleistung zum Verstellen der Aufnehmer	298

5	Digitale Grundschaltungen; Zeit- und Frequenzmesstechnik	300
5.1	Binäre Signale und ihre logischen Verknüpfungen	300
5.1.1	Binäre Signale	300
5.1.2	Logische Verknüpfungen binärer Signale	300
5.2	Darstellung, Anzeige und Ausgabe numerischer Messwerte	304
5.2.1	Duales Zahlensystem	304
5.2.2	Binärcodes für Dezimalzahlen	305
5.2.3	Ziffernanzeige; Vergleich mit Skalenanzeige	306
5.2.4	Umsetzung eines digitalen Signals in eine Spannung	307
5.3	Bistabile Kippstufen	309
5.3.1	Asynchrones <i>RS</i> -Speicherglied	309
5.3.2	Taktgesteuertes <i>RS</i> -Speicherglied	310
5.3.3	Taktflankengesteuertes <i>D</i> -Speicherglied	311
5.3.4	Taktflankengesteuertes <i>JK</i> -Speicherglied	312
5.3.5	Taktflankengesteuertes <i>T</i> -Speicherglied	313
5.4	Zähler	313
5.4.1	Asynchroner Vorwärts-Dualzähler	314
5.4.2	Synchroner Vorwärts-Dualzähler	315
5.4.3	Synchroner Vorwärts-BCD-Zähler	315
5.5	Register	317
5.5.1	Parallelregister	317
5.5.2	Schieberegister zur Parallel/Serien-Umsetzung	318
5.5.3	Schieberegister zur Serien/Parallel-Umsetzung	319
5.5.4	Multiplexer als Parallel/Serien-Umsetzer	321
5.6	Digitale Zeitmessung	321
5.6.1	Einführung	321
5.6.2	Digitale Messung eines Zeitintervalls	322
5.6.3	Messung einer Periodendauer	323
5.6.4	Messung eines Phasenwinkels	323
5.7	Digitale Frequenzmessung	325
5.7.1	Digitale Messung einer Frequenz oder einer Impulsrate	325

5.7.2	Messung des Verhältnisses zweier Frequenzen oder Drehzahlen	326
5.7.3	Messung der Differenz zweier Frequenzen oder Drehzahlen . . .	326
5.7.4	Universalzähler	326
5.8	Analoge Messung eines Zeitintervalls oder einer Frequenz	327
5.8.1	Analoge Messung eines Zeitintervalls; t/u -Umformung	328
5.8.2	Analoge Messung einer Frequenz oder Impulsrate; f/u -Umformung	328
5.9	Drehzahlaufnehmer	330
6	Analog/Digital-Umsetzer für elektrische und mechanische Größen	332
6.1	Abtast- und Halteglied mit Multiplexer	332
6.2	Direkt vergleichende A/D-Umsetzer	333
6.2.1	Komparator	333
6.2.2	Komparator mit Hysterese	334
6.2.3	A/D-Umsetzer mit parallelen Komparatoren	335
6.2.4	Kaskaden-Parallel-Umsetzer	337
6.2.5	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Annäherung an den Messwert .	338
6.3	Spannung/Zeit- und Spannung/Frequenz-Umsetzer	340
6.3.1	u/t -Zweirampen-Umsetzer	340
6.3.2	u/f -Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren	343
6.3.3	Synchroner u/f -Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren .	345
6.3.4	Delta-Sigma-Umsetzer	346
6.4	Kenngrößen der Analog/Digital-Umsetzer	349
6.4.1	Kennlinie	349
6.4.2	Abtasttheorem	351
6.4.3	Umsetzrate und Auflösung	352
6.4.4	Quantisierungsrauschen, Zahl der effektiven Bit	353
6.5	Analog/Digital-Umsetzer in Messgeräten	356
6.5.1	Digital-Multimeter	356
6.5.2	Digitales Speicher-Oszilloskop	357
6.5.3	Logikanalysator	359
6.6	A/D-Umsetzer für mechanische Größen	360

6.6.1	Endlagenschalter	361
6.6.2	Codierte Längen- und Winkelgeber	362
6.6.3	Inkrementale Längen- und Winkelgeber	363
6.6.4	Vergleich der codierten und inkrementalen Längengeber	367

7 Schwingungsmessungen 368

7.1	Astabile Kippschaltungen als Frequenzumsetzer	368
7.1.1	Kippschaltung mit Verstärker und Komparator	368
7.1.2	Kippschaltung mit stabilisierten Hilfsspannungen	372
7.2	Harmonische Oszillatoren	373
7.2.1	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen	374
7.2.2	<i>LC</i> -Oszillator	375
7.2.3	<i>RC</i> -Oszillator	378
7.3	Piezoelektrische Resonatoren	381
7.3.1	Volumenschwingende Quarze	381
7.3.2	Oberflächenwellen OFW in Quarzen	389
7.3.3	Funkabfragbare Sensoren	393
7.3.4	Ultraschall-Durchflussmesser	395
7.4	Mechanische Schwingungen	399
7.4.1	Charakteristische Größen	399
7.4.2	Relative Schwingungsmessung	400
7.4.3	Absolute Schwingungsmessung	403
7.4.4	Monolithisch integrierter Beschleunigungssensor	406
7.4.5	Schwingsaiten-Frequenzumsetzer	407
7.4.6	Stimmgabel-Frequenzumsetzer	408
7.4.7	Coriolis-Massendurchflussmesser	410

8 Spektralanalyse 413

8.1	Aufgabenstellung	413
8.2	FTC eines zeitkontinuierlichen Signals	413
8.3	FTD eines zeitdiskreten Signals	414
8.3.1	Übergang vom zeitkontinuierlichen zum zeitdiskreten Signal	414

8.3.2	Unterschiede bei der Transformation eines zeitkontinuierlichen und eines zeitdiskreten Signals	416
8.3.3	Abtasttheorem	417
8.4	DFT eines abgetasteten, zeitbegrenzten Signals	418
8.4.1	Datensatz mit endlich vielen Werten; diskrete Spektralfunktion	418
8.4.2	Zusammenhang zwischen FTD und DFT; Anhängen von Nullen	422
8.4.3	Wahl der Abtastfrequenz	425
8.4.4	Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT	426
8.5	DFT eines abgetasteten, nicht zeitbegrenzten Signals	428
8.5.1	Konstantes Signal	429
8.5.2	Periodisches Signal	432
8.5.3	Anhängen von Nullen, Abtastfrequenz und Messzeit	438
8.5.4	Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT	438
8.6	Fensterfunktionen	440
8.6.1	Kriterien zur Beurteilung	440
8.6.2	Fensterfunktionen und ihre Spektren	441
8.6.3	Fensterung bei transienten Signalen	445
8.7	Anwendungen der DFT	446
8.8	Leistungsmessung im Zeit- und Frequenzbereich	447
9	Rechnerunterstützte Messsysteme	452
9.1	Einführung	452
9.2	Aufbau eines Personal Computers	452
9.2.1	Gerätetechnik	452
9.2.2	Software	454
9.3	Schnittstellen und Bussysteme	456
9.3.1	Einführung	456
9.3.2	Serielle RS-232-Schnittstelle und abgeleitete Schnittstellen . . .	460
9.3.3	Universal Serial Bus USB	463
9.3.4	Paralleler IEC-Bus (GPIB-Bus, IEEE-488-Bus)	464
9.3.5	Kabellose Netzwerke; Bluetooth, WLAN und IrDA	468
9.4	Messgeräte mit integrierter digitaler Schnittstelle	469

9.4.1	Anschluss	469
9.4.2	Steuerung	470
9.5	Messgeräte ohne integrierte Schnittstelle	472
9.5.1	Prinzip	472
9.5.2	Aufbau einer Messkarte	473
9.5.3	Anschluss einer Messkarte an einen Rechner	477
9.6	Messprogramme	478
9.6.1	Aufgaben der Messprogramme	478
9.6.2	Ablauf eines rechnergestützten Messprozesses	479
9.6.3	Virtuelles Messgerät	483
9.6.4	LabVIEW	484
9.6.5	MATLAB	486
9.7	Beispiel: Messung des linearen Frequenzgangs	489
Literaturverzeichnis		493
Tabellenverzeichnis		503
Sachwortverzeichnis		505