

1	Grundlagen	17
1.1	Umfang und Bedeutung der elektrischen Messtechnik	17
1.2	Naturkonstanten und Maßeinheiten	19
1.2.1	Naturkonstanten	19
1.2.2	Internationales Einheitensystem, SI-Einheiten	20
1.2.3	Definition und Darstellung der Sekunde	22
1.2.4	Definition und Darstellung des Meters	24
1.2.5	Definition und Darstellung des Kilogramms	24
1.2.6	Definition und Darstellung der elektrischen Einheiten	26
1.2.7	Die SI-Einheiten der Temperatur, der Stoffmenge und der Lichtstärke	30
1.2.8	Größen- und Zahlenwertgleichungen	31
1.3	Statisches Verhalten der Messgeräte	32
1.3.1	Kennlinie und Empfindlichkeit	32
1.3.2	Unsicherheiten bei Messungen	33
1.3.3	Bekannte und unbekannte, systematische und zufällige Messfehler	35
1.3.4	Normalverteilte Zufallsfehler; Einzelmesswerte	37
1.3.5	Normalverteilte Zufallsfehler; Mittelwerte	38
1.3.6	Normalverteilte Zufallsfehler; verknüpfte Messgrößen	41
1.3.7	Student'sche t -Verteilung	44
1.3.8	Gleichverteilung	45
1.3.9	Zusammenfassung	46
1.4	Korrelierte Messgrößen	47
1.4.1	Varianz, Kovarianz und Korrelationskoeffizient	47
1.4.2	Berücksichtigung der Kovarianz in der Fehlerrechnung	47
1.5	Dynamisches Verhalten der Messgeräte	50
1.5.1	Verzögerungsglied 1. Ordnung	51
1.5.2	Verzögerungsglied 2. Ordnung	59
1.5.3	Weitere Beispiele für das Zeitverhalten	66

1.6	Dynamische Messfehler	69
1.6.1	Fehlermöglichkeiten	70
1.6.2	Korrektur des dynamischen Fehlers.....	72
1.7	Strukturen von Messeinrichtungen	74
1.7.1	Kettenstruktur	74
1.7.2	Parallelstruktur	75
1.7.3	Kreisstruktur.....	77
1.8	Die informationstragenden Parameter der Messsignale	78
1.9	Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen	81
1.9.1	Physikalische Effekte zum elektrischen Messen nichtelektrischer Größen	81
1.9.2	Sensornahe Signalverarbeitung.....	82

2 Messung von Strom und Spannung;

spannungs- und stromliefernde Aufnehmer	83
2.1 Elektromechanische Messgeräte und ihre Anwendung	83
2.1.1 Messwerke	83
2.1.2 Messung von Gleichstrom und Gleichspannung.....	88
2.1.3 Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	95
2.1.4 Messung der Leistung	101
2.1.5 Messung der elektrischen Arbeit	107
2.1.6 Registrierende Messgeräte.....	108
2.2 Elektronenstrahl-Oszilloskop	111
2.2.1 Elektronenstrahl-Röhre	111
2.2.2 Baugruppen	113
2.2.3 Spezial-Oszilloskope	118
2.2.4 Betriebsarten des Elektronenstrahl-Oszilloskops	119
2.3 Messverstärker	121
2.3.1 Einführung.....	121
2.3.2 Nicht invertierender Spannungsverstärker	126
2.3.3 Invertierender Stromverstärker	133
2.3.4 Anwendungen des Spannungsverstärkers	138
2.3.5 Anwendungen des Stromverstärkers.....	140
2.3.6 Nullpunktfehler des realen Operationsverstärkers.....	145
2.4 Elektrodynamische spannungsliefernde Aufnehmer.....	151
2.4.1 Weg- und Winkelmessung.....	151
2.4.2 Analoge Drehzahlmessung	152

2.4.3	Hall-Sonde	152
2.4.4	Induktions-Durchflussmesser	156
2.5	Thermische spannungsliefernde Aufnehmer	158
2.5.1	Thermoelement	158
2.5.2	Integrierter Sperrschicht-Temperatur-Sensor	164
2.6	Chemische spannungsliefernde Aufnehmer und Sensoren	166
2.6.1	Galvanisches Element	166
2.6.2	pH-Messkette mit Glaselektrode	167
2.6.3	Sauerstoffmessung mit Festkörper-Ionenleiter	169
2.7	Piezo- und pyroelektrische ladungsliefernde Aufnehmer	172
2.7.1	Wirkungsweise und Werkstoffe	172
2.7.2	Piezelektrischer Kraftaufnehmer	174
2.7.3	Pyroelektrischer Infrarot-Sensor	179
2.8	Optische Aufnehmer und Sensoren	182
2.8.1	Fotoelement und Fotodiode	183
2.8.2	Fotosensoren für Positionsmessungen und zur Bilderzeugung	186
2.8.3	Fotozelle	187
2.8.4	Fotovervielfacher	188
2.9	Aufnehmer für ionisierende Strahlung	189
2.9.1	Ionisationskammer	189
2.9.2	Auslöse-Zählrohr	191
2.9.3	Halbleiter-Strahlungsdetektor	192

3 Messung von ohmschen Widerständen;

Widerstandsaufnehmer	195
3.1 Strom- und Spannungsmessung	195
3.1.1 Gleichzeitige Messung von Spannung und Strom	195
3.1.2 Vergleich mit einem Referenzwiderstand	196
3.2 Anwendung einer Konstantstromquelle	197
3.3 Brückenschaltungen	199
3.3.1 Abgleich-Widerstandsmessbrücke	199
3.3.2 Ausschlag-Widerstandsmessbrücke	202
3.4 Verstärker für Brückenschaltungen	206
3.4.1 Subtrahierer mit invertierendem Verstärker	206
3.4.2 Subtrahierer mit Elektrometer-Verstärkern	208
3.4.3 Trägerfrequenz-Brücke und -Messverstärker	210
3.5 Widerstandsaufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	213

3.6	Widerstandstemperaturfühler	214
3.6.1	Metall-Widerstandsthermometer	214
3.6.2	Heißleiter	218
3.6.3	Kaltleiter	221
3.6.4	Silizium-Widerstandstemperatursensor	223
3.6.5	Fehlermöglichkeiten bei der Anwendung von elektrischen Berührungsthermometern	224
3.7	Ermittlung verfahrenstechnischer Größen durch Temperaturmessungen	225
3.7.1	Füllstandswächter	225
3.7.2	Thermischer Massenstrommesser	225
3.7.3	Messung der Luftfeuchte; Messung von Gaskonzentrationen	228
3.8	Gassensoren mit halbleitenden Metalloxiden	230
3.9	Lichtempfindlicher Widerstand	231
3.10	Magnetisch steuerbarer Widerstand	232
3.10.1	Feldplatte	232
3.10.2	Anisotroper Magneto-resistiver Effekt (AMR)	233
3.10.3	Spinventil, Riesenmagnetowiderstand und Kolossaler Magnetowiderstand	234
3.11	Dehnungsmessstreifen	234
3.11.1	Prinzip	234
3.11.2	Metall-Dehnungsmessstreifen	235
3.11.3	Störgrößen	237
3.11.4	Anwendung der DMS zur Spannungsanalyse	238
3.11.5	Halbleiter-Dehnungsmessstreifen	241
3.12	Linearisieren der Widerstandsaufnehmer-Kennlinien	243
3.12.1	Linearisieren durch einen Vor- und/oder Parallelwiderstand	243
3.12.2	Messung der Spannungsdifferenz bei Differenzial- Widerstandsaufnehmern	246
3.12.3	Differenzial-Widerstandsaufnehmer in einer Halbbrücke	247

4 Messung von Blind- und Scheinwiderständen; induktive und kapazitive Aufnehmer 248

4.1	Strom- und Spannungsmessung	248
4.1.1	Messung der Effektivwerte	249
4.1.2	Vergleich mit Referenzelement	250
4.1.3	Getrennte Ermittlung des Blind- und Wirkwiderstandes	251
4.1.4	Messung eines Phasenwinkels	252
4.1.5	Strommessung in einem fremderregten Schwingkreis	254

4.2	Wechselstrom-Abgleichbrücke	255
4.2.1	Prinzip	255
4.2.2	Kapazität-Messbrücke nach Wien	256
4.2.3	Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell	257
4.2.4	Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell-Wien	258
4.2.5	Phasenschieber-Brücke	258
4.3	Wechselspannungs-Ausschlagbrücke	259
4.4	Induktive Aufnehmer	260
4.4.1	Tauchanker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	260
4.4.2	Queranker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	263
4.4.3	Kurzschlussring-Sensor	265
4.4.4	Anwendung der induktiven Längen- und Winkelgeber	265
4.4.5	Induktiver Schleifendetektor zur Erfassung von Fahrzeugen	266
4.4.6	Magnetoelastische Kraftmessdose	267
4.5	Kapazitive Aufnehmer	268
4.5.1	Änderung des Plattenabstands	268
4.5.2	Änderung der Plattenfläche	269
4.5.3	Geometrische Änderung des Dielektrikums	270
4.5.4	Änderung der Permittivitätszahl durch Feuchtigkeit oder Temperatur	272
4.6	Einsatz der induktiven und kapazitiven Abgriffe in Differenzdruck-Messumformern	273
4.7	Vergleich der induktiven und der kapazitiven Längenaufnehmer	275
4.7.1	Energie des magnetischen und des elektrischen Feldes	276
4.7.2	Größe der Brückenschaltung entnehmbare Leistung	277
4.7.3	Steuerleistung zum Verstellen der Aufnehmer	278

5 Digitale Grundsaltungen; Zeit- und Frequenzmesstechnik 280

5.1	Darstellung, Anzeige und Ausgabe numerischer Messwerte	280
5.1.1	Duales Zahlensystem	280
5.1.2	Binärcodes für Dezimalzahlen	281
5.1.3	Ziffernanzeige; Vergleich mit Skalenanzeige	283
5.1.4	Umsetzung eines digitalen Signals in eine Spannung; Digital/Analog-Umsetzer; digital steuerbare Spannungsquelle	283
5.2	Bistabile Kippstufen	285
5.2.1	Asynchrones <i>RS</i> -Speicherglied	285
5.2.2	Taktgesteuertes <i>RS</i> -Speicherglied	286
5.2.3	Taktflankengesteuertes <i>D</i> -Speicherglied	287

5.2.4	Taktflankengesteuertes <i>JK</i> -Speicherglied	288
5.2.5	Taktflankengesteuertes <i>T</i> -Speicherglied	288
5.3	Zähler	289
5.3.1	Synchroner Vorwärts-Dualzähler	289
5.4	Register	290
5.4.1	Parallelregister	290
5.4.2	Schieberegister zur Parallel/Serien-Umsetzung	291
5.4.3	Schieberegister zur Serien/Parallel-Umsetzung	292
5.4.4	Multiplexer als Parallel/Serien-Umsetzer	293
5.5	Digitale Zeitmessung	294
5.5.1	Einführung	294
5.5.2	Digitale Messung eines Zeitintervalls	295
5.5.3	Messung einer Periodendauer	295
5.5.4	Messung eines Phasenwinkels	296
5.6	Digitale Frequenzmessung	297
5.6.1	Digitale Messung einer Frequenz oder einer Impulsrate	297
5.6.2	Messung des Verhältnisses zweier Frequenzen oder Drehzahlen	298
5.6.3	Messung der Differenz zweier Frequenzen oder Drehzahlen	298
5.6.4	Universalzähler	298
5.7	Analoge Messung eines Zeitintervalls oder einer Frequenz	300
5.7.1	Analoge Messung eines Zeitintervalls; t/u -Umformung	300
5.7.2	Analoge Messung einer Frequenz oder Impulsrate; f/u -Umformung	300
5.8	Drehzahlaufnehmer	302

6 Analog/Digital-Umsetzer für elektrische und mechanische

Größen	304	
6.1	Abtast- und Halteglied mit Multiplexer	304
6.2	Direkt vergleichende A/D-Umsetzer	305
6.2.1	Komparator	305
6.2.2	Komparator mit Hysterese	306
6.2.3	A/D-Umsetzer mit parallelen Komparatoren	307
6.2.4	Kaskaden-Parallel-Umsetzer	309
6.2.5	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Annäherung an den Messwert	310
6.3	Spannung/Zeit- und Spannung/Frequenz-Umsetzer	312
6.3.1	u/t -Zweirampen-Umsetzer	312
6.3.2	u/f -Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren	314

6.3.3	Synchroner u/f -Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren	316
6.3.4	Delta-Sigma-Umsetzer	317
6.4	Kenngrößen der Analog/Digital-Umsetzer	320
6.4.1	Kennlinie	320
6.4.2	Abtasttheorem	321
6.4.3	Umsetzrate und Auflösung	322
6.4.4	Quantisierungsrauschen, Zahl der effektiven Bit	323
6.5	Analog/Digital-Umsetzer in Messgeräten	326
6.5.1	Digital-Multimeter	326
6.5.2	Digitales Speicher-Oszilloskop	327
6.5.3	Logikanalysator	329
6.6	A/D-Umsetzer für mechanische Größen	330
6.6.1	Endlagenschalter	330
6.6.2	Codierte Längen- und Winkelgeber	332
6.6.3	Inkrementale Längen- und Winkelgeber	333
6.6.4	Vergleich der codierten und inkrementalen Längengeber	336

7 Schwingungsmessungen **337**

7.1	Astable Kippschaltungen als Frequenzumsetzer	337
7.1.1	Kippschaltung mit Verstärker und Komparator	337
7.1.2	Kippschaltung mit stabilisierten Hilfsspannungen	340
7.2	Harmonische Oszillatoren	342
7.2.1	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen	342
7.2.2	LC -Oszillator	343
7.2.3	RC -Oszillator	346
7.3	Piezoelektrische Resonatoren	349
7.3.1	Volumenschwingende Quarze	349
7.3.2	Oberflächenwellen OFW in Quarzen	357
7.3.3	Funkabfragbare Sensoren	359
7.3.4	Ultraschall-Durchflussmesser	361
7.4	Mechanische Schwingungen	365
7.4.1	Charakteristische Größen	365
7.4.2	Relative Schwingungsmessung	365
7.4.3	Absolute Schwingungsmessung	368
7.4.4	Monolithisch integrierter Beschleunigungssensor	371
7.4.5	Schwingsaiten-Frequenzumsetzer	372
7.4.6	Stimmgabel-Frequenzumsetzer	373
7.4.7	Coriolis-Massendurchflussmesser	375

8	Spektralanalyse	377
8.1	Aufgabenstellung	377
8.2	FTC eines zeitkontinuierlichen Signals	377
8.3	FTD eines zeitdiskreten Signals	378
8.3.1	Übergang vom zeitkontinuierlichen zum zeitdiskreten Signal	378
8.3.2	Unterschiede bei der Transformation eines zeitkontinuierlichen und eines zeitdiskreten Signals	379
8.3.3	Abtasttheorem	380
8.4	DFT eines abgetasteten, zeitbegrenzten Signals	381
8.4.1	Datensatz mit endlich vielen Werten; diskrete Spektralfunktion	381
8.4.2	Zusammenhang zwischen FTD und DFT; Anhängen von Nullen	384
8.4.3	Wahl der Abtastfrequenz	388
8.4.4	Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT	389
8.5	DFT eines abgetasteten, nicht zeitbegrenzten Signals	391
8.5.1	Konstantes Signal	392
8.5.2	Periodisches Signal	394
8.5.3	Anhängen von Nullen, Abtastfrequenz und Messzeit	400
8.5.4	Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT	401
8.6	Fensterfunktionen	403
8.6.1	Kriterien zur Beurteilung	403
8.6.2	Fensterfunktionen und ihre Spektren	404
8.6.3	Fensterung bei transienten Signalen	408
8.7	Anwendungen der DFT	409
8.8	Leistungsmessung im Zeit- und Frequenzbereich	410
9	Rechnerunterstützte Messsysteme	415
9.1	Einführung	415
9.2	Aufbau eines Personal Computers	415
9.2.1	Gerätetechnik	415
9.2.2	Software	416
9.3	Schnittstellen und Bussysteme	416
9.3.1	Einführung	416
9.3.2	Serielle RS-232-Schnittstelle und abgeleitete Schnittstellen	419
9.3.3	Universal Serial Bus USB	422
9.3.4	Paralleler IEC-Bus (GPIB-Bus, IEEE-488-Bus)	422
9.3.5	Kabellose Netzwerke; Bluetooth, WLAN und IrDA	426

9.4	Messgeräte mit integrierter digitaler Schnittstelle	427
9.4.1	Anschluss	427
9.4.2	Steuerung	427
9.5	Messgeräte ohne integrierte Schnittstelle	429
9.5.1	Prinzip	429
9.5.2	Aufbau einer Messkarte	429
9.6	Messprogramme	433
9.6.1	Aufgaben der Messprogramme	433
9.6.2	Ablauf eines rechnergestützten Messprozesses	434
9.6.3	Virtuelles Messgerät	438
9.6.4	LabVIEW	438
9.6.5	MATLAB	443
9.7	Energieautarke, funkabfragbare verteilte Messsysteme	444
 Literatur		 450
 Index		 459