

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

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

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 Heißleiter	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 Magnetoresistiver 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

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 GröÙte der Brückenschaltung entnehmbare Leistung	258
4.7.3 Steuerleistung zum Verstellen der Aufnehmer	259

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 RS-Speicherglied	266
5.2.2 Taktgesteuertes RS-Speicherglied	267
5.2.3 Taktflankengesteuertes D-Speicherglied	268

5.2.4	Taktflankengesteuertes JK -Speicherglied	269
5.2.5	Taktflankengesteuertes T -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

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 **315**

7.1	Astable 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 **352**

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

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