

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	1
1.1 Umfang und Bedeutung der elektrischen Meßtechnik	1
1.2 Maßeinheiten	3
1.2.1 Internationales Einheitensystem, SI-Einheiten	4
1.2.2 Einheiten und Naturkonstanten	7
1.2.3 Meßunsicherheit bei der Darstellung der Grundeinheiten	8
1.2.4 Größen- und Zahlenwertgleichungen	11
1.2.5 Umrechnung nichtkohärenter Einheiten	12
1.3 Statisches Verhalten der Meßgeräte	12
1.4 Dynamisches Verhalten der Meßgeräte	14
1.5 Meßfehler und Meßunsicherheit	17
1.5.1 Voraussetzungen für eine fehlerfreie Messung	17
1.5.2 Systematische Meßfehler	18
1.5.3 Zufällige Meßfehler	20
1.5.4 Meßunsicherheit bei bekannten Garantiefehlerrgrenzen	29
1.6 Strukturen von Meßeinrichtungen	31
1.6.1 Kettenstruktur	31
1.6.2 Parallelstruktur	32
1.6.3 Kreisstruktur	35
1.7 Die informationstragenden Parameter der Meßsignale	36
2 Messung von Strom und Spannung; spannung- und stromliefernde Aufnehmer	40
2.1 Elektromechanische Meßgeräte und ihre Anwendung	40
2.1.1 Meßwerke	40
2.1.2 Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	46
2.1.3 Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	54
2.1.4 Messung der Leistung	62
2.1.5 Messung der elektrischen Arbeit	69
2.2 Kompensatoren	70
2.2.1 Gleichspannungskompensation	71
2.2.2 Gleichstromkompensation	72
2.2.3 Servomultiplizierer und -dividierer	73
2.3 Meßwerk- und Kompensationsschreiber	74
2.3.1 Konstruktionsmerkmale	74
2.3.2 Ausführungsformen	75
2.3.3 Anwendungsbereiche der verschiedenen Systeme	78
2.4 Elektronenstrahl-Oszilloskop	79
2.4.1 Elektronenstrahl-Röhre	79
2.4.2 Baugruppen	81
2.4.3 Spezial-Oszilloskope	88
2.4.4 Betriebsarten des Elektronenstrahl-Oszilloskops	89
2.5 Meßverstärker	91
2.5.1 Einführung	91
2.5.2 Nichtinvertierender Spannungsverstärker	98
2.5.3 Invertierender Stromverstärker	105
2.5.4 Anwendungen des Spannungsverstärkers	110

2.5.5	Anwendungen des Stromverstärkers	112
2.5.6	Nullpunktfehler des realen Operationsverstärkers	118
2.5.7	Modulationsverstärker	124
2.5.8	Verstärkerrauschen	130
2.6	Spannungsliefernde Aufnehmer	131
2.6.1	Differential-Transformator zur Weg- und Winkelmessung	132
2.6.2	Induktions-Drehzahlgeber	133
2.6.3	Elektrodynamischer Schwingungsgeber	134
2.6.4	Elektromagnetischer Schwingungsgeber	134
2.6.5	Wiegand-Sensor	135
2.6.6	Magnetostriktiver Schwingungsgeber	136
2.6.7	Hall-Sonde	137
2.6.8	Induktions-Durchflußmesser	141
2.6.9	Thermoelement	143
2.6.10	Integrierter Temperatur-Sensor mit pn-Übergang	149
2.6.11	pH-Meßkette	150
2.7	Strom- und ladungsliefernde Aufnehmer	153
2.7.1	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	153
2.7.2	Photoelement und Photodiode	157
2.7.3	Photozelle	162
2.7.4	Photovervielfacher	163
2.7.5	Ionisationskammer	163
2.7.6	Auslöse-Zählrohr	167
2.7.7	Szintillationszähler	170
2.7.8	Halbleiter-Strahlungsdetektor	171
3	Messung von ohmschen Widerständen; Widerstandsaufnehmer	174
3.1	Strom- und Spannungsmessung	174
3.1.1	Gleichzeitige Messung von Spannung und Strom	174
3.1.2	Vergleich mit einem Referenzwiderstand	175
3.1.3	Speisung mit konstantem Strom und Messung des Spannungsabfalls	176
3.1.4	Spannungsteiler	177
3.2	Abgleich-Widerstandsmeßbrücke	178
3.3	Ausschlag-Widerstandsmeßbrücke	181
3.3.1	Wirkungsweise	181
3.3.2	Brücke, mit einer konstanten Spannung gespeist	182
3.3.3	Brücke, mit einem konstanten Strom gespeist	184
3.3.4	Ersatzschaltbild für die belastete Brücke	185
3.3.5	Kompensation des Zuleitungswiderstandes	186
3.3.6	Meßstellenumschaltung	187
3.3.7	Nullpunktunterdrückung und Kompensation unerwünschter Einflüsse	188
3.4	Verstärker für Brückenschaltungen	189
3.4.1	Subtrahierer mit invertierendem Verstärker	189
3.4.2	Widerstandsaufnehmer in der Gegenkopplungsleitung eines Differenz-Verstärkers	190
3.4.3	Subtrahierer mit Elektrometerverstärker	191
3.4.4	Trägerfrequenz-Brücke und -Meßverstärker	194
3.5	Widerstandsaufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	196
3.6	Widerstands-Temperaturfühler	197

3.6.1	Metall-Widerstandsthermometer	197
3.6.2	Heißleiter	200
3.6.3	Kaltleiter	202
3.6.4	Silizium-Widerstandstemperatursensor	204
3.6.5	Fehlermöglichkeiten bei der Anwendung von elektrischen Berührungsthermometern	206
3.7	LiCl-Feuchtemeßgeber	207
3.8	Gasanalyse mit Hilfe von Temperaturmessungen	209
3.8.1	Gasanalyse nach dem Wärmeleitverfahren	209
3.8.2	Gasanalysator nach dem Wärmetönungsverfahren	210
3.8.3	Thermomagnetischer Sauerstoffanalysator	211
3.9	Hitzdraht-Anemometer	212
3.10	Lichtempfindlicher Widerstand	214
3.11	Magnetisch steuerbarer Widerstand	216
3.12	Dehnungsmeßstreifen	217
3.12.1	Wirkungsweise und Aufbau	217
3.12.2	Anwendung der DMS zur Spannungsanalyse	221
3.12.3	Anwendung der DMS in Meßeinrichtungen	224
3.13	Linearisieren der Widerstandsaufnehmer-Kennlinien	227
3.13.1	Linearisieren durch einen Vor- und/oder Parallelwiderstand	227
3.13.2	Messung des Spannungsabfalls an Differential-Widerstandsaufnehmern	230
3.13.3	Differential-Widerstandsaufnehmer in einer Halbbrücke	231
4	Messung von Blindwiderständen; induktive und kapazitive Aufnehmer	232
4.1	Bestimmung des Blindwiderstandes durch eine Strom-, Spannungs- oder Leistungsmessung	233
4.1.1	Gleichzeitige Messung von Spannung und Strom	233
4.1.2	Vergleich mit Referenzelementen	234
4.1.3	Leistungsmessung	235
4.1.4	Messung eines Phasenwinkels	236
4.1.5	Strommessung in einem fremderregten Schwingkreis	238
4.2	Wechselstrom-Abgleichbrücke	239
4.2.1	Prinzip	239
4.2.2	Kapazitätsmeßbrücke nach Wien	240
4.2.3	Induktivitätsmeßbrücke nach Maxwell	242
4.2.4	Induktivitätsmeßbrücke nach Maxwell-Wien	242
4.2.5	Phasenschieberbrücke	243
4.3	Wechselstrom-Ausschlagbrücke	243
4.4	Induktive Aufnehmer	245
4.4.1	Tauchanker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	245
4.4.2	Queranker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	248
4.4.3	Kurzschlußbring-Sensor	250
4.4.4	Anwendung der induktiven Längen- und Winkelgeber	250
4.4.5	Induktiver Schleifendetektor zur Erfassung von Fahrzeugen	252
4.4.6	Magnetoelastische Kraftmeßdose	252
4.5	Kapazitive Aufnehmer	253
4.5.1	Änderung des Plattenabstands	253
4.5.2	Änderung der Plattenfläche	254
4.5.3	Geometrische Änderung des Dielektrikums	256

4.5.4	Änderung der Dielektrizitätszahl durch Feuchtigkeit oder Temperatur	258
4.6	Vergleich der induktiven und der kapazitiven Längenaufnehmer	259
4.6.1	Energie des magnetischen und des elektrischen Feldes	260
4.6.2	Größe der Brückenschaltung entnehmbare Leistung	261
4.6.3	Steuerleistung zum Verstellen der Aufnehmer	262
5	Digitale Meßtechnik; kodierte und inkrementale Meßwertgeber	264
5.1	Binäre Signale und ihre logischen Verknüpfungen	264
5.1.1	Binäre Signale	264
5.1.2	Logische Verknüpfungen binärer Signale	265
5.1.3	Gatter	268
5.2	Darstellung, Anzeige und Ausgabe numerischer Meßwerte	270
5.2.1	Duales Zahlensystem	270
5.2.2	Binärcodes für Dezimalzahlen	271
5.2.3	Code-Umsetzer	273
5.2.4	Ziffernanzeigen	274
5.2.5	Vergleich der Ziffern- mit der Skalenanzeige	275
5.2.6	Umsetzung eines digitalen Signals in eine Spannung; Digital/Analog-Umsetzer	276
5.3	Bistabile Kippstufen	277
5.3.1	Asynchrones RS-Speicherglied	277
5.3.2	Taktgesteuertes RS-Speicherglied	279
5.3.3	Taktflankengesteuertes D-Speicherglied	280
5.3.4	Taktflankengesteuertes JK-Speicherglied	280
5.3.5	Taktflankengesteuertes T-Speicherglied	281
5.4	Zähler	282
5.4.1	Asynchroner Vorwärts-Dualzähler	282
5.4.2	Asynchroner Rückwärts-Dualzähler	283
5.4.3	Umschaltung der Zählrichtung	284
5.4.4	Synchroner Vorwärts-Dualzähler	285
5.4.5	Synchroner Vorwärts-BCD-Zähler	286
5.4.6	Synchroner Ringzähler	287
5.4.7	Anzeige einer Zählgröße	288
5.5	Register	289
5.5.1	Parallelregister	289
5.5.2	Schieberegister zur Parallel/Serien-Umsetzung	290
5.5.3	Schieberegister zur Serien/Parallel-Umsetzung	291
5.6	Umschalter	293
5.6.1	Multiplexer für binäre Signale	293
5.6.2	Umschalter mit Relaiskontakten für analoge Signale	293
5.6.3	Umschalter mit Feldeffekttransistoren für analoge Signale	294
5.6.4	Abtast- und Haltekreis	295
5.7	Direktvergleichende A/D-Umsetzer für elektrische Spannungen	296
5.7.1	Komparator	296
5.7.2	Komparator mit Hysterese	297
5.7.3	A/D-Umsetzer mit parallelen Komparatoren	299
5.7.4	Inkrementaler A/D-Stufenumsetzer	300
5.7.5	Inkrementaler A/D-Nachlaufumsetzer	301
5.7.6	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Annäherung an den Meßwert	302

5.7.7	Digitalmultimeter	304
5.8	A/D-Umsetzer für mechanische Größen; kodierte und inkrementale Längen- und Winkelgeber	305
5.8.1	Endlagenschalter	306
5.8.2	Kodierte Längen- und Winkelgeber	307
5.8.3	Inkrementale Längen- und Winkelgeber	309
5.8.4	Vergleich der kodierten und inkrementalen Längengeber	312
6	Zeit- und Frequenzmessung; frequenzanaloge Meßwertgeber und Wandler	313
6.1	Zeitmessung	313
6.1.1	Digitale Messung eines Zeitintervalls	313
6.1.2	Digitale Messung einer Periodendauer	314
6.1.3	Digitale Messung des Phasenwinkels	315
6.1.4	Analoge Messung eines Zeitintervalls; t/u-Umformung	316
6.1.5	Normalfrequenz- und Zeitzeichensender	317
6.2	Frequenzmessung	318
6.2.1	Digitale Messung einer Frequenz oder Impulsrate	318
6.2.2	Digitale Messung des Verhältnisses zweier Frequenzen oder Drehzahlen	319
6.2.3	Universalzähler	319
6.2.4	Digitale Messung der Differenz zweier Frequenzen oder Drehzahlen	321
6.2.5	Analoge Messung einer Frequenz oder Impulsrate; f/u-Umformung	321
6.3	Spannung/Zeit- und Spannung/Frequenz-Umsetzer	324
6.3.1	u/t-Impulsbreiten-Umsetzer	324
6.3.2	u/t-Zweirampen-Umsetzer	327
6.3.3	Impulsbreiten-Multiplizierer	329
6.3.4	u/f-Sägezahn-Umsetzer	330
6.3.5	u/f-Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren	332
6.3.6	Synchroner u/f-Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren	334
6.4	Astable Kippschaltungen als Frequenzumsetzer	336
6.4.1	Astable Kippschaltung aus RC-Glied und Komparator	336
6.4.2	Kippschaltung mit Integrationsverstärker und Komparator	337
6.4.3	Kippschaltung mit Widerstandsmeßbrücke	341
6.4.4	Kippschaltung mit stabilisierten Hilfsspannungen	342
6.4.5	u/f-Umsetzer für kleine Signale	343
6.5	Harmonische Oszillatoren als Frequenzumsetzer	345
6.5.1	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen	345
6.5.2	LC-Oszillator	346
6.5.3	RC-Oszillator	347
6.5.4	Differentialgleichung eines harmonischen Oszillators	349
6.6	Frequenz- oder impulsratenliefernde Aufnehmer	351
6.6.1	Quarzoszillator	351
6.6.2	Schwingsaiten-Frequenzumsetzer	358
6.6.3	Stimmgabel-Frequenzumsetzer	360
6.6.4	Drehzahlaufnehmer	362
6.6.5	Wirbelfrequenz-Durchflußmesser	363
	Anhang. Schreibweise der Gleichungen für Ströme und Spannungen	365
	Literaturverzeichnis	367
	Sachwortverzeichnis	372