

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 Statische Meßfehler und Meßunsicherheiten	14
1.4.1 Voraussetzungen für eine fehlerfreie Messung	14
1.4.2 Systematische Meßfehler	15
1.4.3 Zufällige Meßfehler	17
1.4.4 Meßunsicherheit bei bekannten Garantiefehlergrenzen	26
1.5 Dynamisches Verhalten der Meßgeräte	28
1.5.1 Verzögerungsglied 1. Ordnung	29
1.5.2 Verzögerungsglied 2. Ordnung	37
1.5.3 Weitere Beispiele für das Zeitverhalten	45
1.6 Dynamische Meßfehler	48
1.6.1 Fehlermöglichkeiten	48
1.6.2 Korrektur des dynamischen Fehlers	51
1.7 Strukturen von Meßeinrichtungen	53
1.7.1 Kettenstruktur	53
1.7.2 Parallelstruktur	54
1.7.3 Kreisstruktur	57
1.8 Die informationstragenden Parameter der Meßsignale	58
1.9 Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen	61
1.9.1 Physikalische Effekte zum elektrischen Messen nichtelektrischer Größen	61
1.9.2 Technologien zur Sensorfertigung	61
1.9.3 Sensornahe Signalverarbeitung	67
2 Messung von Strom und Spannung; spannung- und stromliefernde Aufnehmer	69
2.1 Elektromechanische Meßgeräte und ihre Anwendung	69
2.1.1 Meßwerke	69
2.1.2 Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	76
2.1.3 Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	84
2.1.4 Messung der Leistung	92
2.1.5 Messung der elektrischen Arbeit	99
2.2 Kompensatoren	100
2.2.1 Gleichspannungskompensation	101
2.2.2 Gleichstromkompensation	102
2.2.3 Servomultiplizierer und -dividierer	103
2.3 Meßwerk- und Kompensationsschreiber	104
2.3.1 Konstruktionsmerkmale	104

2.3.2	Ausführungsformen	105
2.3.3	Anwendungsbereiche der verschiedenen Systeme	108
2.4	Elektronenstrahl-Oszilloskop	109
2.4.1	Elektronenstrahl-Röhre	109
2.4.2	Baugruppen	111
2.4.3	Spezial-Oszilloskope	118
2.4.4	Betriebsarten des Elektronenstrahl-Oszilloskops	119
2.5	Meßverstärker	121
2.5.1	Einführung	121
2.5.2	Nichtinvertierender Spannungsverstärker	128
2.5.3	Invertierender Stromverstärker	135
2.5.4	Anwendungen des Spannungsverstärkers	140
2.5.5	Anwendungen des Stromverstärkers	142
2.5.6	Nullpunktfehler des realen Operationsverstärkers	148
2.5.7	Modulationsverstärker	155
2.6	Elektrodynamische spannungsliefernde Aufnehmer	161
2.6.1	Weg- und Winkelmessung	162
2.6.2	Analoge Drehzahlmessung	164
2.6.3	Hall-Sonde	165
2.6.4	Induktions-Durchflußmesser	169
2.7	Thermische spannungsliefernde Aufnehmer	171
2.7.1	Thermoelement	171
2.7.2	Integrierter Sperrschicht-Temperatur-Sensor	179
2.8	Chemische spannungsliefernde Aufnehmer und Sensoren	180
2.8.1	Galvanisches Element	180
2.8.2	pH-Meßkette mit Glaselektrode	181
2.8.3	Ionensensitiver Feldeffekt-Transistor	184
2.8.4	Gassensitiver Feldeffekt-Transistor	186
2.8.5	Sauerstoffmessung mit Festkörper-Ionenleiter	186
2.9	Piezo- und pyroelektrische ladungsliefernde Aufnehmer	190
2.9.1	Wirkungsweise und Werkstoffe	190
2.9.2	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	192
2.9.3	Pyroelektrischer Infrarot-Sensor	198
2.10	Optische Aufnehmer und Sensoren	201
2.10.1	Photoelement und Photodiode	202
2.10.2	Photosensoren für Positionsmessungen und zur Bilderzeugung	205
2.10.3	Photozelle	207
2.10.4	Photovervielfacher	208
2.11	Aufnehmer für ionisierende Strahlung	208
2.11.1	Ionisationskammer	208
2.11.2	Auslösezählrohr	212
2.11.3	Szintillationszähler	215
2.11.4	Halbleiter-Strahlungsdetektor	216
3	Messung von ohmschen Widerständen; Widerstandsaufnehmer	219
3.1	Strom- und Spannungsmessung	219
3.1.1	Gleichzeitige Messung von Spannung und Strom	219
3.1.2	Vergleich mit einem Referenzwiderstand	220
3.2	Verwendung einer Konstantstromquelle	221

3.3	Brückenschaltungen	226
3.3.1	Abgleich-Widerstandsmeßbrücke	226
3.3.2	Ausschlag-Widerstandsmeßbrücke	229
3.4	Verstärker für Brückenschaltungen	237
3.4.1	Subtrahierer mit invertierendem Verstärker	237
3.4.2	Subtrahierer mit Elektrometerverstärker	238
3.4.3	Trägerfrequenz-Brücke und -Meßverstärker	240
3.5	Widerstandsaufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	243
3.6	Widerstands-Temperaturfühler	244
3.6.1	Metall-Widerstandsthermometer	244
3.6.2	Heißeleiter	249
3.6.3	Kaltleiter	252
3.6.4	Silizium-Widerstandstemperatursensor	254
3.6.5	Fehlermöglichkeiten bei der Anwendung von elektrischen Berührungsthermometern	256
3.7	Indirekte Anwendung der Widerstandsthermometer für Konzentrationsmessungen	257
3.7.1	LiCl-Feuchtegeber	258
3.7.2	Gasanalyse nach dem Wärmeleitverfahren	260
3.7.3	Gasanalyse nach dem Wärmetönungsverfahren	261
3.7.4	Thermomagnetische Sauerstoffanalyse	262
3.7.5	Gasaufbereitung	263
3.8	Metalloxid-Widerstands-Gassensor	263
3.9	Lichtempfindlicher Widerstand	265
3.10	Magnetisch steuerbarer Widerstand	266
3.11	Dehnungsmeßstreifen	268
3.11.1	Prinzip	268
3.11.2	Metall-Dehnungsmeßstreifen	269
3.11.3	Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen	271
3.11.4	Störgrößen	271
3.11.5	Anwendung der DMS zur Spannungsanalyse	272
3.12	Linearisieren der Widerstandsaufnehmer-Kennlinien	276
3.12.1	Linearisieren durch einen Vor- und/oder Parallelwiderstand	277
3.12.2	Messung des Spannungsabfalls an Differential-Widerstandsaufnehmern	280
3.12.3	Differential-Widerstandsaufnehmer in einer Halbbrücke	281
4	Messung von Blind- und Scheinwiderständen; induktive und kapazitive Aufnehmer	282
4.1	Strom- und Spannungsmessung	283
4.1.1	Messung der Effektivwerte	283
4.1.2	Vergleich mit Referenzelement	284
4.1.3	Getrennte Ermittlung des Blind- und Wirkwiderstands	285
4.1.4	Messung eines Phasenswinkels	286
4.1.5	Strommessung in einem fremderregten Schwingkreis	288
4.2	Wechselstrom-Abgleichbrücke	289
4.2.1	Prinzip	289
4.2.2	Kapazitätsmeßbrücke nach Wien	290
4.2.3	Induktivitätsmeßbrücke nach Maxwell	292
4.2.4	Induktivitätsmeßbrücke nach Maxwell-Wien	292
4.2.5	Phasenschieberbrücke	293

4.3	Wechselstrom-Ausschlagbrücke	293
4.4	Induktive Aufnehmer	295
4.4.1	Tauchanker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	295
4.4.2	Queranker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	298
4.4.3	Kurzschlußring-Sensor	300
4.4.4	Anwendung der induktiven Längen- und Winkelgeber	300
4.4.5	Induktiver Schleifendetektor zur Erfassung von Fahrzeugen	302
4.4.6	Magnetoelastische Kraftmeßdose	302
4.5	Kapazitive Aufnehmer	303
4.5.1	Änderung des Plattenabstands	303
4.5.2	Änderung der Plattenfläche	304
4.5.3	Geometrische Änderung des Dielektrikums	306
4.5.4	Änderung der Dielektrizitätszahl durch Feuchtigkeit oder Temperatur	308
4.6	Vergleich der induktiven und der kapazitiven Längenaufnehmer	309
4.6.1	Energie des magnetischen und des elektrischen Feldes	310
4.6.2	Größe der Brückenschaltung entnehmbare Leistung	311
4.6.3	Steuerleistung zum Verstellen der Aufnehmer	312
5	Digitale Meßtechnik; kodierte und inkrementale Meßwertgeber	314
5.1	Binäre Signale und ihre logischen Verknüpfungen	314
5.1.1	Binäre Signale	314
5.1.2	Logische Verknüpfungen binärer Signale	315
5.1.3	Gatter	318
5.2	Darstellung, Anzeige und Ausgabe numerischer Meßwerte	320
5.2.1	Duales Zahlensystem	320
5.2.2	Binärcodes für Dezimalzahlen	321
5.2.3	Code-Umsetzer	323
5.2.4	Ziffernanzeigen	324
5.2.5	Vergleich der Ziffern- mit der Skalenanzeige	325
5.2.6	Umsetzung eines digitalen Signals in eine Spannung; Digital/Analog-Umsetzer	326
5.3	Bistabile Kippstufen	327
5.3.1	Asynchrones RS-Speicherglied	327
5.3.2	Taktgesteuertes RS-Speicherglied	329
5.3.3	Taktflankengesteuertes D-Speicherglied	330
5.3.4	Taktflankengesteuertes JK-Speicherglied	330
5.3.5	Taktflankengesteuertes T-Speicherglied	331
5.4	Zähler	332
5.4.1	Asynchroner Vorwärts-Dualzähler	332
5.4.2	Asynchroner Rückwärts-Dualzähler	333
5.4.3	Umschaltung der Zählrichtung	334
5.4.4	Synchroner Vorwärts-Dualzähler	335
5.4.5	Synchroner Vorwärts-BCD-Zähler	336
5.4.6	Synchroner Ringzähler	337
5.4.7	Anzeige einer Zählgröße	338
5.5	Register	339
5.5.1	Parallelregister	339
5.5.2	Schieberegister zur Parallel/Serien-Umsetzung	340
5.5.3	Schieberegister zur Serien/Parallel-Umsetzung	341

5.6	Umschalter	343
5.6.1	Multiplexer für binäre Signale	343
5.6.2	Umschalter mit Relaiskontakten für analoge Signale	343
5.6.3	Umschalter mit Feldeffekttransistoren für analoge Signale	344
5.6.4	Abtast- und Haltekreis	345
5.7	Direktvergleichende A/D-Umsetzer für elektrische Spannungen	346
5.7.1	Komparator	346
5.7.2	Komparator mit Hysterese	347
5.7.3	A/D-Umsetzer mit parallelen Komparatoren	349
5.7.4	Inkrementaler A/D-Stufenumsetzer	350
5.7.5	Inkrementaler A/D-Nachlaufumsetzer	351
5.7.6	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Annäherung an den Meßwert	352
5.7.7	Digitalmultimeter	354
5.7.8	Digital-Oszilloskop	355
5.8	A/D-Umsetzer für mechanische Größen; kodierte und inkrementale Längen- und Winkelgeber	356
5.8.1	Endlagenschalter	357
5.8.2	Kodierte Längen- und Winkelgeber	358
5.8.3	Inkrementale Längen- und Winkelgeber	360
5.8.4	Vergleich der kodierten und inkrementalen Längengeber	363
6	Zeit- und Frequenzmessung; frequenzanaloge Meßwertgeber und Wandler	364
6.1	Digitale Zeitmessung	364
6.1.1	Messung eines Zeitintervalls	364
6.1.2	Messung einer Periodendauer	365
6.1.3	Messung des Phasenwinkels	366
6.1.4	Normalfrequenz- und Zeitzeichensender	367
6.2	Digitale Frequenzmessung	368
6.2.1	Messung einer Frequenz oder Impulsrate	368
6.2.2	Messung des Verhältnisses zweier Frequenzen oder Drehzahlen	369
6.2.3	Universalzähler	369
6.2.4	Messung der Differenz zweier Frequenzen oder Drehzahlen	371
6.3	Spannung/Zeit- und Spannung/Frequenz-Umsetzer	371
6.3.1	u/t-Impulsbreiten-Umsetzer	371
6.3.2	u/t-Zweirampen-Umsetzer	374
6.3.3	u/f-Sägezahn-Umsetzer	377
6.3.4	u/f-Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren	378
6.3.5	Synchroner u/f-Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren	380
6.3.6	Vergleich der verschiedenen Umsetzverfahren	382
6.4	Analoge Messung eines Zeitintervalls oder einer Frequenz	384
6.4.1	Messung eines Zeitintervalls; t/u-Umformung	384
6.4.2	Messung einer Frequenz oder Impulsrate; f/u-Umformung	385
6.4.3	Impulsbreiten-Multiplizierer	387
6.5	Astabile Kippschaltungen als Frequenzumsetzer	388
6.5.1	Astabile Kippschaltung aus RC-Glied und Komparator	388
6.5.2	Astabile Kippschaltung mit Integrationsverstärker und Komparator	390
6.5.3	Kippschaltung mit Widerstandsmeßbrücke	393
6.5.4	Kippschaltung mit stabilisierten Hilfsspannungen	394
6.5.5	u/f-Umsetzer für kleine Signale	396

6.6	Harmonische Oszillatoren als Frequenzumsetzer	397
6.6.1	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen	398
6.6.2	LC-Oszillator	399
6.6.3	RC-Oszillator	402
6.7	Frequenz- oder impulsratenliefernde Aufnehmer	405
6.7.1	Schwingquarz als Frequenznormal	405
6.7.2	Schwingquarz als Temperaturfühler	413
6.7.3	Schwingsaiten-Frequenzumsetzer	414
6.7.4	Stimmgabel-Frequenzumsetzer	415
6.7.5	Drehzahlaufnehmer	417
7	Messung mechanischer Größen	420
7.1	Druck- und Differenzdruckmessung mit Federmeßwerken	420
7.1.1	Direktanzeigende Manometer	421
7.1.2	Federmeßwerke mit elektrischem Abgriff	421
7.1.3	Differenzdruck-Meßumformer mit innenliegendem elektrischen Abgriff	426
7.1.4	Anwendung der Druck- und Differenzdruckmeßgeräte zur Füllstandsmessung	428
7.2	Durchflußmessung	429
7.2.1	Durchflußmessung mit Drosselmeßgeräten	430
7.2.2	Wirbelfrequenz-Durchflußmesser	435
7.2.3	Thermischer Massenstrommesser	436
7.2.4	Coriolis-Massenstrommesser	440
7.2.5	Ultraschall-Durchflußmessung	442
7.3	Schwingungsmessung	447
7.3.1	Relative Schwingungsmessung	448
7.3.2	Absolute Schwingungsmessung	451
	Literaturverzeichnis	458
	Sachwortverzeichnis	465