

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort.</b>	5
<b>1 Grundbegriffe der Meßtechnik</b>	13
1.1 Größen, Einheiten, Normalien	13
1.1.1 Größen und Einheiten	13
1.1.2 Internationales Einheitensystem (SI)	15
1.1.3 Normalien	16
1.2 Meßfehler	19
1.2.1 Fehlerarten und Fehlerangabe	20
1.2.2 Rechnen mit systematischen Fehlern	21
1.2.2.1 Fehlerfortpflanzung bei der Addition und Subtraktion von Meßwerten	22
1.2.2.2 Fehlerfortpflanzung bei der Multiplikation von Meßwerten	23
1.2.2.3 Fehlerfortpflanzung bei der Division von Meßwerten	25
1.2.3 Rechnen mit zufälligen Fehlern	26
1.2.3.1 Normalverteilung	26
1.2.3.2 Auswertung einer Meßreihe	30
1.2.3.3 Fehlerfortpflanzung von zufälligen Fehlern	31
1.2.4 Fehlerangaben bei Meßgeräten	32
1.2.4.1 Garantiefehlergrenzen und Fehlerfortpflanzung	32
1.2.4.2 Klasseneinteilung nach VDE 0410	34
<b>2 Kenngrößen von Strom und Spannung</b>	35
2.1 Mittelwerte periodischer Spannungen und Ströme	37
2.1.1 Linearer Mittelwert	38
2.1.2 Quadratischer Mittelwert	40
2.1.2.1 Effektivwert der Leistung	42
2.1.2.2 Effektivwert von Spannung und Stromstärke	42
2.1.3 Gleichrichtwert	45
2.1.4 Besondere Kenngrößen der Mittelwerte	47
2.2 Kenngrößen nichtsinusförmiger periodischer Spannungen und Ströme	50
2.2.1 Amplitudenspektrum-Frequenz	50
2.2.1.1 Sinusverwandte Spannungen	52
2.2.1.2 Pulsspannungen	55
2.2.2 Klirrfaktor	57
<b>3 Meßprinzipien elektrischer Zeigerinstrumente</b>	59
3.1 Das Meßwerk als Meßumformer	59
3.1.1 Abbildungsmaßstab	59
3.1.2 Drehmomentwaage	61
3.1.3 Wirbelstrombremse	62
3.2 Dämpfung von Meßwerken	63
3.2.1 Dämpfungsmaßnahmen	65

3.3	Lagerung	66
3.3.1	Spitzen- und Zapfenlager	66
3.3.2	Spannband- und Tragbandlager	67
3.4	Drehspulmeßwerk	69
3.4.1	Drehspulprinzip	69
3.4.2	Bauformen des Drehspulmeßwerks	72
3.4.2.1	Außenmagnetmeßwerk	72
3.4.2.2	Kernmagnetmeßwerk	72
3.4.2.3	Temperaturkompensation	73
3.4.2.4	Dämpfung	75
3.5	Kreuzspulmeßwerk	75
3.6	Drehmagnetmeßwerk	79
3.7	Elektrodynamisches Meßwerk	80
3.8	Dreheisenmeßwerk	84
3.9	Elektrostatisches Meßwerk	87
3.10	Thermische Meßwerke	90
3.11	Induktionsmeßwerk	92
3.11.1	Wirkungsprinzip	92
3.11.2	Anwendung des Scheibeninduktionsmeßwerks	95
3.12	Vibrationsmeßwerke	98
3.13	Registrierende Meßgeräte	98
3.13.1	Meßwerkschreiber	99
3.13.2	Spezielle Registriergeräte	102
3.14	Meßwerksymbole und Zeichen	103
<b>4</b>	<b>Meßprinzip des Oszilloskops</b>	<b>107</b>
4.1	Aufbau und Wirkungsweise der Oszilloskopröhre	107
4.2	Baugruppen und Kennwerte	113
4.2.1	y-Kanal	115
4.2.2	z-Eingang	118
4.2.3	Gesteuerte Zeitablenkung	118
4.2.4	x-Eingang	123
4.2.5	Verzögerte Zeitbasis	124
4.3	2-Kanal-Oszilloskop	126
4.3.1	y-Kanäle	126
4.3.2	2-Kanal-Betrieb	126
4.3.3	x-y-Betrieb	129
4.4	Tastköpfe	129
4.4.1	Tastleiter	129
4.4.2	Tastteiler	130
4.4.3	Tastrichter	131
4.5	Messungen mit dem Oszilloskop	132
4.5.1	Messung von Gleich-, Wechsel- und Mischspannungen	132
4.5.2	Frequenzmessung	134

4.5.3	Messung der Phasenverschiebung	137
4.5.4	Kennlinienaufnahme einer Z-Diode	140
4.5.5	Darstellung der Hysteresekurve eines Eisenkerns	140
<b>5</b>	<b>Meßverfahren zur Messung elektrischer Größen</b>	<b>143</b>
5.1	Meßgenauigkeit	143
5.2	Spannungs- und Strommessung mit dem Drehspulmeßwerk	143
5.2.1	Gleichspannungsmessung	143
5.2.1.1	Meßbereichserweiterung	145
5.2.1.2	Spannungsmessung und systematischer Fehler	147
5.2.2	Gleichstrommessung	148
5.2.2.1	Meßbereichserweiterung	148
5.2.2.2	Strommessung und systematischer Fehler	151
5.2.3	Wechselspannungsmessung	152
5.2.3.1	Drehspulmeßwerk mit Mittelwertgleichrichter	152
5.2.3.2	Drehspulmeßwerk mit stromgespeistem Mittelwertgleichrichter	154
5.2.3.3	Drehspulmeßwerk mit Spitzenwertgleichrichter	157
5.2.4	Wechselstrommessung	158
5.2.4.1	Meßbereichserweiterung	158
5.2.5	Schaltung eines Vielfachmeßgeräts zur Spannungs- und Strommessung	159
5.3	Messung des Effektivwertes von Strom und Spannung	160
5.3.1	Messung mit dem Dreheisenmeßwerk	160
5.3.1.1	Strommessung	160
5.3.1.2	Spannungsmessung	161
5.3.2	Messung mit Thermoumformer und Drehspulmeßwerk	162
5.3.3	Spannungskomparator	163
5.3.4	Effektivwertmessung mit Hilfe eines Analogrechners	164
5.4	Kompensationsverfahren zur Spannungs- und Strommessung	165
5.4.1	Gleichspannungskompensatoren	165
5.4.2	Gleichstromkompensatoren	170
5.4.3	Selbstabgleichende Kompensatoren	170
5.5	$U$ - $f$ - und $U$ - $t$ -Umformer	172
5.5.1	$U$ - $f$ -Umformer	173
5.5.2	$U$ - $t$ -Impulsbreitenumformer	176
5.6	Leistungsmessung	181
5.6.1	Das elektrodynamische Meßwerk als Leistungsmesser	181
5.6.1.1	Gleichstromkreis	181
5.6.1.2	Wechselstromkreis	183
5.6.1.3	Leistung im Drehstromnetz	186
5.6.2	Leistungsmessung mit Multiplizierschaltungen	193
5.6.2.1	Leistungsmessung mit integrierten Bausteinen	193
5.6.2.2	Hall-Multiplizierer	195
5.6.2.3	Time-Division-Multiplizierer zur Leistungsmessung	197
5.7	Messung von ohmschen Widerständen	198

5.7.1	Strom-Spannungs-Messung	199
5.7.1.1	Spannungsfehlerschaltung	199
5.7.1.2	Stromfehlerschaltung	202
5.7.2	Spannungs- und Stromvergleich	203
5.7.2.1	Spannungsvergleich	204
5.7.2.2	Stromvergleich	205
5.7.3	Brückenschaltung nach dem Abgleichverfahren	206
5.7.3.1	Schleifdrahtbrücke	208
5.7.3.2	Wheatstonesche Brücke für Präzisionsmessungen	209
5.7.3.3	Thomson-Meßbrücke	211
5.7.3.4	Fehlerbetrachtung zur Abgleichbrücke	212
5.7.4	Ausschlagbrückenschaltung	213
5.7.4.1	Brückenspannung im unbelasteten Zustand	214
5.7.4.2	Brückenspannung im belasteten Zustand	218
5.7.4.3	Linearisierung der Ausschlagbrücke	220
5.7.5	Direktanzeigende Widerstandsmesser	224
5.7.5.1	Widerstandsmesser mit Kreuzspulinstrument	224
5.7.5.2	Widerstandsmesser mit Drehspulinstrument	226
5.7.5.3	Widerstandsmesser mit Stromquelle	227
5.7.6	<i>R-T</i> -Umformer	228
5.7.6.1	<i>R-T</i> -Umformer mit Integrator	229
5.7.6.2	<i>R-T</i> -Umformer mit astabilem Multivibrator	232
5.8	Messung von Spulen und Kondensatoren	233
5.8.1	Ersatzschaltungen von Spulen und Kondensatoren	233
5.8.2	Blindwiderstandsbestimmung durch Strom-, Spannungs- und Leistungsmessungen	237
5.8.2.1	Strom- und Spannungs-Messung	237
5.8.2.2	Strom- und Spannungsvergleich bei Kondensatoren	238
5.8.2.3	3-Spannungsmesser-Methode	240
5.8.2.4	Leistungsmessung	242
5.8.3	Messen mit dem phasenselektiven Gleichrichter	243
5.8.4	Resonanzverfahren	245
5.8.4.1	<i>L</i> - und <i>C</i> -Messung mit Parallelschwingkreis	245
5.8.4.2	Methode der abklingenden Schwingung	248
5.8.5	<i>L-C</i> -Meßbrücken	251
5.8.5.1	Allgemeine Abgleichbedingungen	251
5.8.5.2	Kapazitätsmeßbrücke nach WIEN ( <i>CCRK</i> )	253
5.8.5.3	Schering-Meßbrücke ( <i>CRCC</i> )	256
5.8.5.4	Maxwell-Wien-Brückenschaltung ( <i>LRRC</i> )	258
5.8.5.5	Halbautomatische Wechselstrombrücke	259
5.8.6	Messungen mit dem Differentialübertrager	261
5.8.6.1	Wayne-Kerr-Meßbrücke	263
5.8.7	<i>C-T</i> -Umformer	264
5.9	Frequenz- und Zeitmessung	265

5.9.1	Frequenzmessung mit der Wien-Robinson-Meßbrücke	266
5.9.2	Frequenz- und Zeitintervallzähler	268
5.9.2.1	Frequenzzähler	269
5.9.2.2	Periodendauer- und Impulsbreitenmessung	272
5.10	Phasenwinkelmessung	274
5.10.1	$\varphi$ - $t$ -Umformer	275
5.10.2	Phasenselektiver Gleichrichter	277
<b>6</b>	<b>Elektrische Messung nichtelektrischer Größen</b>	<b>281</b>
6.1	Längenmessung	284
6.1.1	Analoge Längenmessung	285
6.1.1.1	Messung großer Längen	285
6.1.1.2	Messung kleiner Längen	287
6.1.2	Digitale Längenmessung	290
6.1.2.1	Codier-Lineal	291
6.1.2.2	Inkrementale Längenmessung	294
6.2	Winkelmessung	297
6.2.1	Analoge Winkelmessung	297
6.2.2	Digitale Winkelmessung	299
6.3	Messung der Dehnung	300
6.3.1	Dehnungsmeßstreifen	302
6.3.2	Meßschaltungen für Dehnungsmeßstreifen	304
6.4	Kraftmessung	307
6.4.1	Kraftmessung mit dem Piezo-Kristall	308
6.4.2	Kraftmessung mit Dehnungsmeßstreifen	311
6.5	Temperaturmessung	312
6.5.1	Widerstandsthermometer	312
6.5.2	Temperaturmessung mit Thermoelementen	316
<b>7</b>	<b>Elektronische Meßgeräte</b>	<b>323</b>
7.1	Meßverstärker	323
7.1.1	Aufgaben und Eigenschaften	323
7.1.2	Grundformen	325
7.1.3	Direktgekoppelte Instrumentierungsverstärker	328
7.1.4	Trägerfrequenzverstärker	330
7.1.4.1	Chopperverstärker	331
7.1.4.2	Modulationsverstärker	337
7.1.5	Rechnende Verstärker	339
7.1.5.1	Addier- und Subtrahierverstärker	339
7.1.5.2	Betragbildung	340
7.1.5.3	Mittelwertbildung	342
7.1.5.4	Multiplizier- und Dividiervverstärker	345
7.2	D/A- und A/D-Umsetzer	352
7.2.1	Digital-Analog-Umsetzer (DAU)	354
7.2.1.1	Kenngrößen	354

7.2.1.2	Codierung für Unipolar- und Bipolarbetrieb	359
7.2.1.3	Fehlergrößen	361
7.2.1.4	Schaltungsprinzipien	365
7.2.1.5	Steuerung mit einem Mikroprozessor	371
7.2.2	Analog-Digital-Umsetzer	374
7.2.2.1	Kenngrößen	375
7.2.2.2	Momentanwertumsetzer	380
7.2.2.3	Integrierende Umsetzer	394
7.2.2.4	Steuerung mit einem Mikroprozessor	398
7.3	Digitalmultimeter (DMM)	400
7.3.1	Aufbau und Baugruppen	401
7.3.2	Systemmeßgeräte	404
7.4	Spezialoszilloskope	405
7.4.1	Kennlinienschreiber	405
7.4.2	Samplingoszilloskop	407
7.4.2.1	Sequentielles Samplingverfahren	407
7.4.2.2	Zeitablenkfaktor	409
7.4.2.3	x-Schreibdauer	412
7.4.2.4	Blockschaltbild	413
7.4.3	Frequenzanalysator	415
7.4.4	Digitalspeicheroszilloskop	419
7.4.4.1	Baugruppen	420
7.4.4.2	Betriebsformen	425
7.4.5	Logikanalysator	427
7.5	Automatische Meßtechnik	430
7.5.1	Aufbau eines Meßsystems	430
7.5.2	IEC-625-Bussystem	434
7.5.2.1	Struktur	436
7.5.2.2	Handshakeverfahren	442
7.5.2.3	Managementbus	444
7.5.2.4	Datenbus	445
7.5.3	Programmierung eines IEC-625-Bussystems	454
7.5.3.1	Adressierung der Geräte	454
7.5.3.2	Makros für Busbefehle	455
7.5.3.3	BASIC-Befehle zur Datenübertragung	455
7.5.3.4	Beispielprogramm zur Meßdatenerfassung	457
<b>Anhang</b>		
A	Übungsaufgaben zur Lernkontrolle	463
B	Lösung der Übungsaufgaben	487
<b>Literaturverzeichnis</b>		501
<b>Stichwortverzeichnis</b>		505