

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Messung und Meßfehler</b>	<b>1</b>
1.1	Definitionen	1
1.2	Anzeige- und Wiederholgenauigkeit	2
1.3	Gültige Stellen	3
1.4	Fehlerarten	5
1.4.1	Grobe Fehler	5
1.4.2	Systematische Fehler	6
1.4.3	Zufällige Fehler	7
1.5	Statistische Analyse	8
1.5.1	Arithmetisches Mittel	8
1.5.2	Abweichung vom Mittelwert	8
1.5.3	Mittlere Abweichung	9
1.5.4	Standardabweichung	9
1.6	Fehlerwahrscheinlichkeit	10
1.6.1	Normalverteilung von Fehlern	10
1.6.2	Wahrscheinlicher Fehler	12
1.7	Fehlergrenzen	13
	Literatur	13
	Fragen	14
	Aufgaben	14
<b>2</b>	<b>Einheiten und Einheitensysteme</b>	<b>17</b>
2.1	Basiseinheiten und abgeleitete Einheiten	17
2.2	Einheitensysteme	18
2.3	Elektrische und magnetische Einheiten	20
2.4	Internationales Einheitensystem	23
2.5	Andere Einheitensysteme	23
2.6	Umrechnung von Einheiten	27
	Literatur	27
	Aufgaben	28
<b>3</b>	<b>Bezugsnormale in der Meßtechnik</b>	<b>29</b>
3.1	Einteilung der Normale	29

3.2	Normale für Masse, Länge und Volumen . . . . .	30
3.3	Zeit- und Frequenznormale . . . . .	31
3.4	Elektrische Normale . . . . .	33
3.4.1	Das absolute Ampere . . . . .	33
3.4.2	Widerstandsnormale . . . . .	34
3.4.3	Spannungsnormale . . . . .	36
3.4.4	Kapazitätsnormale . . . . .	38
3.4.5	Induktivitätsnormale . . . . .	39
3.5	Normale für Temperatur und Lichtintensität . . . . .	40
3.6	IEEE-Normen . . . . .	41
	Literatur . . . . .	41
	Aufgaben . . . . .	42
4.	<b>Elektromechanische Anzeiginstrumente . . . . .</b>	<b>43</b>
4.1	Spiegelgalvanometer . . . . .	43
4.2	Drehmoment und Ablenkung des Galvanometers . . . . .	44
4.2.1	Eingeschwungener Zustand . . . . .	44
4.2.2	Dynamisches Verhalten . . . . .	46
4.2.3	Dämpfungsmechanismus . . . . .	47
4.3	Drehspulmeßwerke . . . . .	48
4.3.1	Das d'Arsonval-Meßwerk . . . . .	48
4.3.2	Magnetkernkonstruktion . . . . .	51
4.3.3	Spannbandaufhängung . . . . .	52
4.3.4	Temperaturkompensation . . . . .	53
4.4	Gleichstrommeßwerke . . . . .	54
4.4.1	Parallelwiderstand . . . . .	54
4.4.2	Ayrton-Shunt . . . . .	55
4.5	Gleichspannungsmeßgeräte . . . . .	57
4.5.1	Vorwiderstand . . . . .	57
4.5.2	Mehrbereichs-Spannungsmeßgeräte . . . . .	58
4.6	Empfindlichkeit des Voltmeters . . . . .	59
4.6.1	Widerstands/Spannungs-Verhältnis . . . . .	59
4.6.2	Belastungseffekt . . . . .	59
4.7	Die Voltmeter-Amperemeter-Methode zur Messung von Widerständen . . . . .	61
4.8	Serien-Ohmmeter . . . . .	63
4.9	Shunt-Ohmmeter . . . . .	65
4.10	Multimeter oder Vielfachmeßinstrument . . . . .	68
4.11	Eichung von Gleichstrominstrumenten . . . . .	71

4.12	Instrumente für Wechselstrom . . . . .	72
4.12.1	Elektrodynamometer . . . . .	72
4.12.2	Gleichrichterinstrumente . . . . .	75
4.12.3	Typische Multimeter-Schaltungen . . . . .	78
4.13	Thermoinstrumente . . . . .	80
4.13.1	Instrumente mit Thermoelementen . . . . .	80
4.14	Elektrodynamometer für Leistungsmessungen . . . . .	82
4.14.1	Einphasiges Wattmeter . . . . .	82
4.15	Wattstundenmeßgeräte . . . . .	85
4.16	Leistungsfaktormeßgeräte . . . . .	86
4.17	Meßtransformatoren . . . . .	88
	Literatur . . . . .	92
	Aufgaben . . . . .	92
<b>5</b>	<b>Brücken und ihre Anwendung . . . . .</b>	<b>95</b>
5.1	Einführung . . . . .	95
5.2	Wheatstone-Brücke . . . . .	95
5.2.1	Grundlagen . . . . .	95
5.2.2	Meßfehler . . . . .	97
5.2.3	Ersatzschaltung von Helmholtz . . . . .	97
5.3	Kelvin-Brücke . . . . .	101
5.3.1	Einfluß von Verbindungsleitungen . . . . .	101
5.3.2	Kelvin-Doppelbrücke . . . . .	102
5.4	Abgeschirmte Wheatstone-Brücke . . . . .	105
5.4.1	Abschirmschaltungen . . . . .	105
5.4.2	Dreileiter-Widerstands-Anordnung . . . . .	106
5.4.3	Megaohm-Brücke . . . . .	108
5.5	Wechselspannungsbrücken und ihre Anwendungen . . . . .	108
5.5.1	Bedingungen für den Brückenabgleich . . . . .	108
5.5.2	Anwendung der Gleichungen . . . . .	110
5.6	Vergleichsbrücken . . . . .	111
5.6.1	Kapazitive Vergleichsbrücke . . . . .	111
5.6.2	Induktive Vergleichsbrücke . . . . .	112
5.7	Maxwell-Brücke . . . . .	114
5.8	Hay-Brücke . . . . .	116
5.9	Schering-Brücke . . . . .	118
5.10	Bedingungen für den nicht abgeglichenen Zustand . . . . .	120
5.11	Wien-Brücke . . . . .	121
5.12	Wagner-Brücke . . . . .	123
5.13	Kompensatoren . . . . .	124

	Literatur . . . . .	126
	Aufgaben . . . . .	126
<b>6</b>	<b>Elektronische Instrumente zur Messung von Basisgrößen . . . . .</b>	<b>129</b>
6.1	Gleichstrommeßinstrumente mit Verstärker . . . . .	130
6.1.1	Choppverstärker . . . . .	131
6.2	Wechselspannungsmeßgeräte mit Gleichrichtern . . . . .	134
6.3	Spannungsmeßgeräte für Effektivwertanzeige . . . . .	136
6.4	Elektronische Multimeter . . . . .	137
6.4.1	Grundschialtung . . . . .	137
6.4.2	Widerstandsbereiche . . . . .	140
6.4.3	Handelsübliche Multimeter . . . . .	141
6.5	Überlegungen bei der Auswahl eines Analog-Voltmeters . . . . .	142
6.5.1	Eingangswiderstand . . . . .	142
6.5.2	Spannungsbereiche . . . . .	143
6.5.3	Dezibel . . . . .	143
6.5.4	Empfindlichkeit oder Bandbreite . . . . .	143
6.5.5	Batterie . . . . .	144
6.5.6	Wechselstrommessungen . . . . .	144
6.6	Differential-Voltmeter . . . . .	144
6.6.1	Differential-Meßwerk . . . . .	144
6.6.2	Gleichspannungsnorm/Differential-Voltmeter . . . . .	146
6.7	Digitalvoltmeter . . . . .	149
6.7.1	Allgemeine Eigenschaften . . . . .	149
6.7.2	Rampen-DVM . . . . .	150
6.7.3	Treppenstufen-DVM . . . . .	152
6.7.4	Integrierende DVM . . . . .	154
6.7.5	DVM mit kontinuierlichem Abgleich . . . . .	156
6.7.6	DVM mit schrittweiser Annäherung . . . . .	157
6.8	Meßinstrumente für Bauelemente . . . . .	159
6.8.1	Vollelektronische Messungen von Bauelementen . . . . .	160
6.8.2	Fehlerquellen . . . . .	163
6.9	Gütefaktor-Meßgeräte . . . . .	166
6.9.1	Grundschialtung der Gütefaktor-Meßgeräte . . . . .	166
6.9.2	Meßmethoden . . . . .	168
6.9.3	Fehlerquellen . . . . .	173
6.10	Vektor-Impedanzmeßgeräte . . . . .	175
6.11	Vektor-Voltmeter . . . . .	179
6.12	Spannungs- und Leistungsmessung bei Hochfrequenz . . . . .	183
	Literatur . . . . .	185
	Aufgaben . . . . .	185

<b>7</b>	<b>Oszilloskope</b>	<b>187</b>
7.1	Einführung	187
7.2	Blockschaltbild eines Oszilloskops	187
7.3	Die Kathodenstrahlröhre	188
7.3.1	Die ersten Kathodenstrahlröhren	188
7.3.2	Elektrostatische Ablenkung	192
7.3.3	Nachbeschleunigung	198
7.3.4	Schirme für Kathodenstrahlröhren	200
7.3.5	Raster	203
7.4	Schaltungen für Kathodenstrahlröhren	203
7.5	Vertikales Ablenkungssystem	204
7.6	Verzögerungsleitung	211
7.6.1	Arbeitsweise der Verzögerungsleitung	211
7.6.2	Punktförmige Verzögerungsleitung	212
7.6.3	Verteilte Verzögerungsleitung	214
7.7	Mehrkanaloszillographen	214
7.8	Horizontal-Ablenksystem	216
7.9	Oszilloskoptastköpfe und Wandler	221
7.10	Oszilloskopische Techniken	224
7.10.1	Frequenzbestimmung	224
7.10.2	Messung von Phasenwinkel und Verzögerungszeit	225
7.10.3	Bestimmung von Signalquellen	228
7.10.4	Bestimmung von Modulationseigenschaften	228
7.11	Spezial-Oszilloskope	230
7.11.1	Speicheroszilloskope	230
7.11.2	Sampling-Oszilloskope	237
	Literatur	239
	Aufgaben	239
<b>8</b>	<b>Signalerzeugung</b>	<b>241</b>
8.1	Der Sinusgenerator	241
8.1.1	Oszillatoren mit Spulen-Kondensator-Abstimmung	242
8.2	Signalgeneratoren mit Frequenzsynthesizer	253
8.3	Generator mit Frequenzteiler	257
8.4	Modulation des Signalgenerators	260
8.5	Wobbelgenerator	260
8.6	Impuls- und Rechteckgeneratoren	264
8.6.1	Einführung	264
8.6.2	Impulseigenschaften und Terminologie	265
8.6.3	Astabiler Multivibrator	267

8.6.4	Rechteck- und Impulsgeneratoren für den Laborgebrauch . . . . .	272
8.7	Signalerzeugung für den Hörfrequenzbereich . . . . .	275
	Literatur . . . . .	277
	Aufgaben . . . . .	277
<b>9</b>	<b>Signalanalyse . . . . .</b>	<b>279</b>
9.1	Frequenzanalytoren . . . . .	279
9.1.1	Selektive Frequenzanalytoren . . . . .	279
9.1.2	Heterodyn-Frequenzanalytator . . . . .	281
9.1.3	Anwendungen . . . . .	282
9.2	Klirrfaktormeßgeräte . . . . .	283
9.2.1	Klirrfaktor . . . . .	283
9.2.2	Analysator mit Abstimmkreis . . . . .	283
9.2.3	Heterodyn-Analysator oder Frequenzmeßgerät . . . . .	284
9.2.4	Klirrfaktormeßgerät mit Unterdrückung der Grundfrequenz . . . . .	285
9.3	Spektralanalyse . . . . .	288
9.3.1	Spektralanalysatoren für höhere Frequenzen . . . . .	298
9.3.2	Anwendungen des Spektralanalysators . . . . .	304
	Literatur . . . . .	306
	Aufgaben . . . . .	306
<b>10</b>	<b>Frequenzzählung und Zeitintervallmessung . . . . .</b>	<b>307</b>
10.1	Einfache Frequenzzähler . . . . .	307
10.1.1	Zähler mit Anzeige . . . . .	309
10.1.2	Zeitbasis . . . . .	313
10.1.3	Verarbeitung des Eingangssignales . . . . .	315
10.1.4	Periodendauermessung . . . . .	316
10.2	Meßfehler . . . . .	319
10.2.1	Gatterfehler . . . . .	319
10.2.2	Zeitbasisfehler . . . . .	320
10.2.3	Fehler des Triggerpegels . . . . .	322
10.3	Erweiterung des Frequenzbereiches des Zählers . . . . .	323
10.4	Automatische und rechnende Zähler . . . . .	327
	Literatur . . . . .	329
	Aufgaben . . . . .	329
<b>11</b>	<b>Meßwandler als Signalquellen für Meßgeräte . . . . .</b>	<b>331</b>
11.1	Einteilung von Meßwandlern . . . . .	331
11.2	Auswahl des Wandlers . . . . .	334
11.3	Dehnungsmeßstreifen . . . . .	335
11.3.1	Dehnungsfaktor . . . . .	335
11.3.2	Metallische Sensoren . . . . .	338

11.3.3	Anordnung der Dehnungsmeßstreifen . . . . .	339
11.3.4	Bauteil mit unverbundenem Dehnungsmeßstreifen . . . . .	340
11.4	Weg-Meßwandler . . . . .	342
11.4.1	Einführung . . . . .	342
11.4.2	Kapazitive Wandler . . . . .	343
11.4.3	Induktive Wandler . . . . .	344
11.4.4	Einstellbare Differentialtransformatoren . . . . .	345
11.4.5	Wandler mit Oszillator . . . . .	348
11.4.6	Photoelektrische Wandler . . . . .	348
11.4.7	Piezoelektrische Wandler . . . . .	350
11.4.8	Potentiometrische Wandler . . . . .	351
11.4.9	Wandler zur Geschwindigkeitsmessung . . . . .	352
11.5	Temperaturmessungen . . . . .	352
11.5.1	Widerstandsthermometer . . . . .	352
11.5.2	Thermoelemente . . . . .	356
11.5.3	Heißeiterkennlinien . . . . .	360
11.5.4	Heißeiteranwendungen . . . . .	362
11.6	Lichtempfindliche Bauelemente . . . . .	366
11.6.1	Einführung . . . . .	366
11.6.2	Vakuumphotozelle . . . . .	366
11.6.3	Gasgefüllte Photozellen . . . . .	368
11.6.4	Sekundärelektronenvervielfacher . . . . .	368
11.6.5	Photowiderstände . . . . .	370
11.6.6	Sperrschicht-Photozellen . . . . .	372
	Literatur . . . . .	372
	Aufgaben . . . . .	372
<b>12</b>	<b>Geräte zur Erfassung von Analog- und Digitaldaten . . . . .</b>	<b>375</b>
12.1	Geräteübersicht . . . . .	375
12.2	Magnetbandgeräte . . . . .	377
12.2.1	Die Bauteile eines Magnetbandgerätes . . . . .	377
12.2.2	Direkte Aufnahme . . . . .	378
12.2.3	Der Magnetisierungsprozeß . . . . .	381
12.2.4	Aufnahme mit Frequenzmodulation . . . . .	384
12.2.5	Digitale Aufzeichnung . . . . .	386
12.3	Selbstableschendes Potentiometer . . . . .	387
12.4	Digital/Analog-Umsetzung . . . . .	389
12.5	Analog/Digital-Umsetzung . . . . .	391
12.5.1	Einführung . . . . .	391
12.5.2	Simultaner A/D-Umsetzer . . . . .	392
12.5.3	A/D-Umsetzer mit Zähler . . . . .	393
12.5.4	Mitlaufender A/D-Umsetzer . . . . .	396

12.5.5	A/D-Umsetzer mit schrittweiser Annäherung . . . . .	399
12.5.6	Abtast-Halte- (Sample-and-hold-) Schaltung . . . . .	402
12.6	Multiplexverfahren . . . . .	404
12.6.1	Digital-Analog-Multiplexen . . . . .	404
12.6.2	Analog/Digital-Multiplexen . . . . .	405
12.7	Schablonencodierer . . . . .	407
	Literatur . . . . .	410
<b>13</b>	<b>Computergesteuerte Prüfsysteme . . . . .</b>	<b>411</b>
13.1	Prüfung eines Niederfrequenzverstärkers . . . . .	411
13.2	Prüfung eines Rundfunkempfängers . . . . .	413
13.3	Geräte, die in einer computergesteuerten Anlage verwendet werden .	418
13.4	Das IEEE-488-Interface . . . . .	423
13.5	Beschreibung der digitalen Steuerung . . . . .	426
13.6	Beispiel des zeitlichen Signalablaufes bei einer mit Mikroprozessor durchgeführten Messung . . . . .	426
	Literatur . . . . .	428
	Aufgaben . . . . .	428
<b>Anhang</b>	<b>. . . . .</b>	<b>429</b>
	Abkürzungen, Symbole und Präfixe . . . . .	431
	Abkürzungen und Symbole . . . . .	431
	Präfixe . . . . .	436
	Dezibel-Umrechnungstabellen . . . . .	437
	Dezibel . . . . .	437
	Neper . . . . .	442
	Beziehungen zwischen Dezibel und Neper . . . . .	442
	Bestimmungen von Werten, die nicht in der Umwandlungstabelle aufgeführt sind . . . . .	443
	Umrechnung von Dezibel in Spannungs- und Leistungsverhältnisse . . . . .	443
	Umrechnung von Spannungsverhältnissen in Dezibel . . . . .	444
	Beispiele . . . . .	445
	Beispiele zu Kapitel 1 . . . . .	445
	Beispiele zu Kapitel 2 . . . . .	452
	Beispiele zu Kapitel 4 . . . . .	454
	Beispiele zu Kapitel 5 . . . . .	463
	Beispiele zu Kapitel 6 . . . . .	469
	Beispiele zu Kapitel 9 . . . . .	473
	Beispiel zu Kapitel 11 . . . . .	474
	Lösungen zu den Aufgaben . . . . .	475
	Zusammenfassende Literatur . . . . .	477
	Sachverzeichnis . . . . .	479