

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>1 Allgemeine Bestimmungen und Grundbegriffe</b> .....	13
1.1 Größen und Einheiten .....	13
1.2 Messen und Messabweichungen .....	15
1.3 Unterteilung von Messgeräten .....	17
1.4 Empfindlichkeit und Auflösung von Messgeräten .....	18
1.5 Eigenabweichung und Genauigkeitsklasse .....	19
1.6 Einstellzeit .....	22
1.7 Skalen und Gehäuse von Analoganzeigern .....	23
1.8 Kenngrößen von Spannungen und Strömen .....	28
1.8.1 Arithmetischer oder linearer Mittelwert .....	29
1.8.2 Effektivwert .....	31
1.8.3 Gleichrichtwert und Formfaktor .....	35
<b>2 Messung elektrischer Größen</b> .....	37
2.1 Analoganzeiger für elektrische Größen .....	37
2.1.1 Dreheisen-Messinstrument .....	38
2.1.2 Drehspul-Messinstrument .....	40
2.1.3 Bimetall-Messinstrument .....	49
2.1.4 Elektrodynamisches Messinstrument .....	50
<i>Leistungsmessung im Drehstromnetz</i> .....	53
<i>Blindleistungsmessung</i> .....	55
2.1.5 Leistungsfaktor-Messinstrument .....	56
2.1.6 Frequenz-Messinstrument .....	58
2.1.7 Kontaktinstrumente .....	59
2.2 Elektronische Anzeiger .....	60
2.2.1 Digitale Anzeigeeinheiten .....	61
2.2.2 A/D-Wandler in digitalen Messinstrumenten .....	62
2.2.3 Elektronische Vielfachmessinstrumente .....	65
2.2.4 Elektronische Leistungsmessung .....	68
<i>Multiplizierer mit Hallgenerator</i> .....	68
<i>Time-Divisions-Multiplizierer</i> .....	69
2.2.5 Digitale Frequenzmessung .....	72
2.3 Messumformer für Starkstromgrößen .....	74
2.3.1 Ausgänge und Kennlinien von Messumformern .....	74
2.3.2 Messumformer für Wechselstrom und Spannung .....	76
2.3.3 Messumformer für Wirk- und Blindleistung .....	77
2.3.4 Messumformer für Leistungsfaktor .....	79
2.3.5 Messumformer für Netzfrequenz .....	79

<b>3</b>	<b>Elektrizitätszähler</b> .....	81
3.1	Smart Meter .....	82
3.1.1	Smart Meter Gateway .....	83
3.2	Einphasiger Induktionszähler .....	83
3.2.1	Aufbau und Wirkungsweise .....	83
3.3	Drehstromzähler .....	85
3.4	Messwandlerzähler .....	85
3.5	Gesetzliche Bestimmungen und Zählerschild .....	85
3.6	Blindverbrauchszähler .....	88
3.7	Schaltungen .....	89
3.7.1	Wirkverbrauchszähler .....	89
3.7.2	Blindverbrauchszähler .....	90
3.8	Sonderzähler .....	91
3.8.1	Mehrtarifzähler .....	91
3.8.2	Maximumzähler .....	92
	<i>Wirkungsweise</i> .....	92
	<i>Ablesen von Maximumzählern</i> .....	94
3.8.3	Überverbrauch- oder Subtraktionszähler .....	96
	<i>96-Stunden-Zähler</i> .....	96
3.8.4	Fernzähleinrichtungen .....	98
	<i>Impulsgeber</i> .....	98
	<i>Impulsempfängerzähler</i> .....	99
3.8.5	Lastüberwachungsanlagen .....	99
	<i>Wirkungsweise</i> .....	100
	<i>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</i> .....	101
<b>4</b>	<b>Messwandler</b> .....	103
4.1	Spannungswandler .....	103
4.1.1	Aufbau .....	103
4.1.2	Wirkungsweise .....	104
	<i>Induktive Spannungswandler</i> .....	104
	<i>Kapazitive Spannungswandler</i> .....	105
4.1.3	Hinweise für die Anwendung .....	105
	<i>Kurzschlussicherung</i> .....	105
	<i>Erdung</i> .....	106
	<i>Schaltungen und Auswahl der Wandler</i> .....	106
	<i>Auswahl der Wandler nach der Belastung der Sekundärseite</i> .....	106
	<i>Genauigkeitsklasse</i> .....	107
	<i>Auswahl nach der Genauigkeitsklasse</i> .....	108
	<i>Sekundärspannungen</i> .....	108
	<i>Leistungsschild</i> .....	108
4.2	Stromwandler .....	109
4.2.1	Aufbau .....	109
4.2.2	Wirkungsweise .....	110
4.2.3	Anwenderhinweise .....	110
	<i>Austausch von Messinstrumenten</i> .....	110
	<i>Erdung</i> .....	110
	<i>Schaltungen</i> .....	110
	<i>Auswahl aus der Sicht verschiedener Bauarten</i> .....	112
	<i>Niederspannungsstromwandler</i> .....	112
	<i>Hochspannungsstromwandler</i> .....	112
	<i>Auswahl nach Gesichtspunkten der Anwendung für Mess- bzw. Schutzzwecke</i> ..	112
	<i>Genauigkeitsklasse</i> .....	116
	<i>Primär- und Sekundärnennströme</i> .....	117

	<i>Auswahl unter dem Gesichtspunkt der Belastung</i> .....	117
	<i>Leistungsschild</i> .....	118
4.2.4	Summenstromwandler .....	119
	<i>Anwendungshinweise</i> .....	119
<b>5</b>	<b>Elektrische Messung nichtelektrischer Größen</b> .....	121
5.1	Einleitung .....	121
5.2	Elektrische Temperaturmessung .....	122
5.2.1	Widerstandstemperaturfühler .....	122
	<i>Metall-Widerstandstemperaturfühler</i> .....	122
	<i>Messumformer für Widerstands-Temperaturfühler</i> .....	124
	<i>NTC-Temperatur-Messwiderstände</i> .....	126
	<i>PTC-Temperatur-Messwiderstände</i> .....	126
	<i>Silizium-Temperatur Sensoren</i> .....	128
5.2.2	Temperaturfühler-IC .....	128
5.2.3	Thermoelektrische Temperaturfühler .....	129
	<i>Thermoelemente für Temperaturmessung</i> .....	130
	<i>Messschaltungen für Thermoelemente</i> .....	130
5.2.4	Infrarot-Temperaturmessung .....	132
	<i>IR-Thermometer und IR-Kameras</i> .....	133
	<i>Einsatzgebiete und Einsatzgrenzen</i> .....	135
5.3	Messung mechanischer Größen .....	135
5.3.1	Kraft-, Druck- und Drehmomentaufnehmer mit Dehnungsmessstreifen .....	136
	<i>Prinzip und Aufbau</i> .....	136
	<i>Anwendung von Dehnungsmessstreifen</i> .....	138
	<i>Messschaltungen für Dehnungsmessstreifen</i> .....	138
5.3.2	Piezoelektrische Kraft- und Schwingungsaufnehmer .....	139
5.3.3	Wegmessung .....	140
	<i>Analoge Wegmessung</i> .....	140
	<i>Digitale Wegmessung</i> .....	143
5.3.4	Druck- und Differenzdruck-Messwertaufnehmer .....	145
	<i>Druckmessaufnehmer mit Rohrfedermesswerk</i> .....	146
	<i>Druckmessaufnehmer mit Membrankörpermesswerk</i> .....	146
	<i>Druckaufnehmer mit Tauchglockenmesswerk</i> .....	147
	<i>Silizium-Drucksensoren</i> .....	148
5.3.5	Durchflussmessung und Strömungswächter .....	148
	<i>Durchflussmessung nach dem Wirkdruckverfahren</i> .....	149
	<i>Kalorimetrische Strömungsmessung und Überwachung</i> .....	149
	<i>Strömungsmessung mit Schwebekörper</i> .....	150
	<i>Strömungsmessung mit Paddel oder Windfahne</i> .....	151
	<i>Strömungsmessung mit Turbinenrad</i> .....	152
	<i>Durchflussmessung nach dem Induktionsprinzip</i> .....	153
5.3.6	Drehzahlaufnehmer und Messumformer .....	153
	<i>Analoge Drehzahlaufnehmer</i> .....	154
	<i>Digitale Drehzahlaufnehmer</i> .....	154
	<i>Drehzahlmessumformer</i> .....	156
	<i>Drehzahlwächter</i> .....	156
5.4	Füllstandsmessung .....	157
5.4.1	Niveaumesswertaufnehmer über Kraft, Druck oder Druckdifferenz .....	158
5.4.2	Niveaumesswertaufnehmer mit Verdrängungskörper .....	158
5.4.3	Niveaumesswertaufnehmer mit Tauchrohr .....	158
5.4.4	Nachlauf-Niveaumesswertgeber .....	159
5.4.5	Kapazitive Niveaumesswertgeber .....	159

5.4.6	Vibrations-Niveaugrenzwertgeber .....	160
5.4.7	Leitfähigkeits-Niveaugrenzwertgeber .....	160
5.4.8	Niveaugrenzwertgeber mit NTC- oder PTC-Widerständen .....	160
5.4.9	Berührungslose Niveaumesswert- und -grenzwertgeber .....	161
5.5	Näherungsinitiatoren .....	162
5.6	Gas- und Feuchte Sensoren .....	164
5.7	Digitalisierung von Messwerten .....	165
5.7.1	Digitale Datenübertragung .....	165
5.7.2	Digitalisierung .....	166
5.7.3	Abtasttheorie .....	169
<b>6</b>	<b>Messung des Zeitverlaufs elektrischer Größen .....</b>	<b>171</b>
6.1	Oszilloskop .....	171
6.2	Elektronenstrahlröhre .....	172
6.3	Bedienung eines Oszilloskops im Einkanalbetrieb .....	175
6.3.1	Inbetriebnahme und Grundeinstellung .....	175
6.3.2	Vertikalablenkteil .....	176
6.3.3	Tast- und Teilerkopf .....	177
6.3.4	Horizontalablenkteil und Zeitbasis .....	179
6.3.5	Triggerung .....	180
6.4	Signalanalysen im Einkanalbetrieb .....	182
6.4.1	Gleichspannungsmessung .....	182
6.4.2	Effektivwertbestimmung .....	184
6.4.3	Frequenzbestimmung .....	185
6.4.4	Bestimmung eines Stromflusswinkels .....	185
6.4.5	Messungen an impulsförmigen Signalen .....	187
6.5	Zweikanalbetrieb .....	190
6.5.1	Bedienung im Zweikanalbetrieb .....	190
6.5.2	Messung eines Phasenwinkels .....	191
6.6	Differenzmessung .....	192
6.7	X-Y-Darstellung .....	193
6.8	Spezielle Zusatzfunktionen im Oszilloskop .....	196
6.9	Netzanalyse und EMV .....	197
<b>7</b>	<b>Regelungstechnik .....</b>	<b>203</b>
7.1	Steuerung und Regelung .....	203
7.2	Regelungstechnische Begriffe .....	205
7.2.1	Beispiel für eine Steuerung .....	206
7.2.2	Beispiel für eine Regelung .....	207
7.3	Regelstrecke .....	208
7.3.1	Das Bügeleisen als Regelstrecke .....	208
7.3.2	Der beheizte Raum als Regelstrecke .....	210
7.3.3	Der Wasserbehälter als Regelstrecke .....	211
7.3.4	Verzögerungsarme Regelstrecke .....	212
7.4	Regelung mit «schaltenden Reglern» .....	213
7.4.1	Zweipunktregler .....	213
	<i>Regelkreis mit Bimetall-Zweipunktregler .....</i>	<i>214</i>
	<i>Regelkreis mit thermischer Rückführung .....</i>	<i>215</i>
7.4.2	Regelkreis mit elektronischem Zweipunktregler .....	217
	<i>Wirkungsweise .....</i>	<i>217</i>
	<i>Operationsverstärker mit elektrischer Rückführung .....</i>	<i>218</i>
7.4.3	Mehrpunktregler .....	218
7.5	Regelung mit stetigen Reglern .....	220
7.5.1	Proportionalregler (P-Regler) .....	220

	<i>Der P-Regler als Wasserstandsregler</i> .....	220
	<i>Regelbedingungen</i> .....	221
	<i>Regelgenauigkeit</i> .....	221
	<i>Reglerkennlinie</i> .....	222
	<i>Sprungantwort</i> .....	223
	<i>Blockbild, Blockschaltbild</i> .....	223
	<i>Der P-Regler als Spannungsregler mit OP</i> .....	224
7.5.2	<i>Integralregler (I-Regler)</i> .....	225
	<i>Sprungantwort</i> .....	225
	<i>Aufbau und Wirkungsweise als Wasserstandsregler</i> .....	226
	<i>Regelung mit Pendelvorgang</i> .....	227
	<i>Der I-Regler als Spannungsregler mit OP</i> .....	228
7.5.3	<i>PI-Regler</i> .....	228
	<i>Aufbau des PI-Reglers als Wasserstandsregler</i> .....	228
	<i>Sprungantwort</i> .....	229
	<i>Regelvorgang</i> .....	229
	<i>Der PI-Regler als Spannungsregler mit OP</i> .....	230
7.5.4	<i>Differentialregler (D-Regler)</i> .....	230
	<i>Aufbau und Wirkungsweise als Wasserstandsregler</i> .....	231
	<i>Sprungantwort</i> .....	231
	<i>Der D-Regler als Spannungsregler mit OP</i> .....	232
7.5.5	<i>PD-Regler</i> .....	232
	<i>Aufbau und Wirkungsweise als Wasserstandsregler</i> .....	232
	<i>Sprungantwort</i> .....	232
	<i>Der PD-Regler als Spannungsregler mit OP</i> .....	233
7.5.6	<i>PID-Regler</i> .....	234
	<i>Aufbau als Wasserstandsregler</i> .....	234
	<i>Sprungantwort</i> .....	234
	<i>Der PID-Regler als Spannungsregler mit OP</i> .....	234
7.5.7	<i>Übersicht über Regleranwendungen</i> .....	235
7.5.8	<i>Übersicht über Reglersprungantworten und Blockbilder</i> .....	236
7.6	<i>Stellglieder</i> .....	236
7.6.1	<i>Auswahl</i> .....	236
7.6.2	<i>Zuordnung von Stellgliedern und Reglern</i> .....	237
7.6.3	<i>Zweipunktregler und Motorstellantrieb</i> .....	239
7.6.4	<i>Dreipunkt-Schrittregler</i> .....	240
7.7	<i>Ergänzende Regelungsbeispiele</i> .....	240
7.7.1	<i>Spannungsregelung eines Gleichstromgenerators</i> .....	240
	<i>Aufgabe</i> .....	240
	<i>Blockschaltbild</i> .....	241
	<i>Regelbedingungen</i> .....	241
	<i>Wirkungsweise</i> .....	241
7.7.2	<i>Gasdruckregelung mit pneumatischem Regler</i> .....	243
	<i>Aufgabe</i> .....	243
	<i>Blockschaltbild</i> .....	243
	<i>Regelbedingungen</i> .....	243
7.7.3	<i>Spannungsregelung mit Stelltransformator</i> .....	244
	<i>Aufgabe</i> .....	244
	<i>Blockschaltbild</i> .....	245
	<i>Regelbedingungen</i> .....	245
	<i>Wirkungsweise</i> .....	246
7.7.4	<i>Flüssigkeitsdurchflussregelung</i> .....	246
	<i>Aufgabe</i> .....	246
	<i>Blockschaltbild</i> .....	246

	<i>Regelbedingungen</i> .....	246
	<i>Wirkungsweise</i> .....	247
7.7.5	Gleichspannungsregelung mit Transistoren .....	248
	<i>Aufgabe</i> .....	248
	<i>Blockschaltbild</i> .....	248
	<i>Regelbedingungen</i> .....	248
	<i>Wirkungsweise</i> .....	249
7.7.6	Regelungsbeispiele .....	249
7.8	Reglerblockdarstellung .....	251
7.8.1	Reglerrückführung .....	251
	<i>P-Reglerrückführung</i> .....	251
	<i>I-Reglerrückführung</i> .....	251
	<i>PI-Reglerrückführung</i> .....	251
	<i>PD-Reglerrückführung</i> .....	251
	<i>PID-Reglerrückführung</i> .....	251
7.8.2	Regelkennlinien der stetigen Regler mit Störgrößensprung .....	252
7.9	Reglereinstellung .....	253
7.9.1	Der bezogene Proportionalbereich $x_p$ .....	254
7.9.2	Nachstellzeit $T_n$ .....	254
7.9.3	Vorhaltzeit $T_v$ .....	255
7.9.4	Der PID-Regler mit $T_n$ und $T_v$ .....	256
7.9.5	Reglereinstellung am Wasserstandsregelmodell .....	256
7.9.6	Praktische Reglereinstellung .....	257
7.10	Digitale Regelung .....	258
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	261