

Inhaltsverzeichnis

1. Meßtechnische Grundlagen

1.1 Meßtechnik-Übersicht	1
1.1.1 Einleitung	1
1.1.2 Definition des Begriffes Messung	2
1.1.3 Arten der Messung	4
1.1.4 Maßsystem, technische Einheiten	5
1.1.5 Maßverkörperungen, Meßnormale	7
1.1.5.1 Spannungsnormale	7
1.1.5.2 Normalwiderstände	8
1.1.6 Messung elektrischer Größen	8
1.1.7 Literatur	13
1.2 Netzwerkberechnung	14
1.2.1 Einführung	14
1.2.1.1 Allgemeines	14
1.2.1.2 Grundgesetze	15
1.2.1.3 Methoden der Netzwerkberechnung	16
1.2.2 Ersatzschaltungen	17
1.2.2.1 Ideale und reale Spannungsquellen	17
1.2.2.2 Ideale und reale Stromquellen	18
1.2.2.3 Ersatzschaltungen linearer Netzwerke	18
1.2.3 Grafische Netzwerkanalyse und -konstruktion	20
1.2.3.1 Parallel- und Serienschaltung von Bauelementen	20
1.2.3.2 Kombinationen von Widerstand und nichtlinearem Bauelement	21
1.2.3.3 Kombinationen von zwei nichtlinearen Bauelementen	23
1.2.3.4 Kenngrößen nichtlinearer Bauelemente in Ersatzschaltungen	24
1.2.4 Dynamisches Verhalten linearer Netzwerke	26
1.2.5 Literatur	32
1.3 Signale, Kenngrößen und Kennwerte	33
1.3.1 Signalklassen und ihre Merkmale	33
1.3.1.1 Deterministische Signale	33
1.3.1.2 Stochastische Signale	35
1.3.2 Kenngrößen von Signalen	38
1.3.2.1 Lineare Kenngrößen	39
1.3.2.2 Quadratische Kenngrößen und andere Kenngrößen 2.Ordnung	40
1.3.2.3 Kennwertfaktoren	44
1.3.2.4 Impulskenngrößen	45
1.3.3 Literatur	47
1.4 Eigenschaften von Meßgeräten	49
1.4.1 Einleitung	49
1.4.2 Begriffsbestimmungen und meßtechnische Eigenschaften	49
1.4.2.1 Meßgröße, Ergebnisgröße, Bewertung, Meßergebnis	49

1.4.2.2	Meßcharakteristik, Meßkoeffizient	50
1.4.2.3	Meßcharakteristik digitaler Meßgeräte, Quantisierung	52
1.4.2.4	Meßbereich	55
1.4.2.5	Auflösung, Genauigkeit, Bewertungsunsicherheit, Intervallgrenzen	56
1.4.2.6	Meßempfindlichkeit	59
1.4.3	Abweichungen und Fehler	60
1.4.3.1	Meßabweichung, Meßunsicherheit	60
1.4.3.2	Systematische Abweichungen	61
1.4.3.3	Einflußgrößen	65
1.4.3.4	Fehlerklassen	66
1.4.3.5	Zufällige Abweichungen, Meßwertverteilungen	68
1.4.3.6	Wiederholbedingungen, Vergleichsbedingungen	75
1.4.3.7	Eichung, Kalibrierung	75
1.4.4	Zeitliche Änderungen des Meßsignals	76
1.4.4.1	Behandlung der Zeit, Darstellung von Meßwerten über der Zeit	76
1.4.4.2	Probleme der Meßwertbildung bei dynamischen Meßgrößen	77
1.4.5	Fehler abgeleiteter Meßergebnisse	78
1.4.5.1	Fehlerfortpflanzung statistischer Größen	80
1.4.5.2	Fehlerfortpflanzung bei Summen- und Produktfunktionen	83
1.4.5.3	Sicherer Fehler, Garantiefehler	84
1.4.5.4	Wahrscheinlicher Fehler	85
1.4.6	Literatur	87
1.5	Digitale Darstellung von Meßwerten	88
1.5.1	Einleitung	88
1.5.2	Zifferndarstellung	88
1.5.3	Zahlendarstellung	89
1.5.3.1	Singuläre Codierung	90
1.5.3.2	Duale Codes für unipolare Meßwerte	90
1.5.3.3	Duale Codes für bipolare Meßwerte	92
1.5.3.4	Einschrittige Codes (Gray Code)	93
1.5.4	Literatur	94
1.6	Abtastung und Rekonstruktion	95
1.6.1	Einleitung und Überblick	95
1.6.2	Abtastung und Aliasing	98
1.6.2.1	Ideale Abtastung eines zeitkontinuierlichen Signals, Abtasttheorem	98
1.6.2.2	Reale Abtastung	100
1.6.2.3	Auftreten von Aliasing	102
1.6.3	Quantisierung	103
1.6.4	Digitale Signalverarbeitung	105
1.6.5	Rekonstruktion	107
1.6.5.1	Ideale Rekonstruktion	107
1.6.5.2	Reale Rekonstruktion	109
1.6.6	Literatur	110

2. Funktionsgruppen, Meßelektronik

2.1 Meßtechnische Bauelemente	112
2.1.1 Einleitung	112
2.1.2 Widerstände	113
2.1.2.1 Kenngrößen und Einflußparameter	113
2.1.2.2 Ausführungsformen von Festwiderständen	114
2.1.2.3 Ausführungsformen von Regelwiderständen	114
2.1.3 Kondensatoren	115
2.1.3.1 Kenngrößen und Einflußparameter	116
2.1.3.2 Ausführungsformen von Kondensatoren	117
2.1.4 Meßspannungsteiler	118
2.1.4.1 Einfache Potentiometerkombinationen	118
2.1.4.2 Mehrbereichsstufenschalter	119
2.1.5 Referenzspannungsquellen	124
2.1.5.1 Spannungsquellen mit Zener-Dioden	124
2.1.5.2 Band-Gap-Referenz	125
2.1.6 Schwingquarze	127
2.1.7 Schalter	128
2.1.8 Batterien und Akkumulatoren	132
2.1.9 Literatur	133
2.2 Meßgrößenaufnehmer, Sensoren	134
2.2.1 Einleitung	134
2.2.2 Überblick	135
2.2.2.1 Sensoren für wichtige nicht-elektrische Größen	135
2.2.2.2 Signalanpassung und -vorverarbeitung	138
2.2.2.3 Ausgangssignale	139
2.2.3 Temperatursensoren	140
2.2.3.1 Widerstandsthermometer	140
2.2.3.2 Thermoelemente	142
2.2.3.3 Integrierte Si-Temperatursensoren mit pn-Übergang	143
2.2.3.4 Schwingquarzthermometer	144
2.2.4 Magnetfeldsensoren	144
2.2.4.1 Hall-Sonde	144
2.2.4.2 Feldplatte	145
2.2.5 Dehnungssensoren	145
2.2.5.1 Dehnmeßstreifen	146
2.2.6 Kraft- und Drucksensoren	147
2.2.6.1 Piezoelektrischer Kraftsensor	147
2.2.6.2 Sensoren nach dem magnetoelastischen Prinzip	148
2.2.7 Positionssensoren	148
2.2.7.1 Potentiometer	149
2.2.7.2 Induktive Sensoren	149
2.2.7.3 Kapazitive Sensoren	149
2.2.7.4 Inkrementalgeber und Absolutgeber	150
2.2.8 Geschwindigkeitssensoren	151

2.2.9	Optische Sensoren	151
2.2.9.1	Photoelemente	151
2.2.9.2	Photodiode	152
2.2.9.3	Phototransistor	152
2.2.9.4	Photowiderstand	152
2.2.10	Literatur	153
2.3	Meßverstärker	154
2.3.1	Einleitung	154
2.3.2	Operationsverstärker	154
2.3.3	Gegengekoppelte OPV-Schaltungen	156
2.3.4	Der ideale Operationsverstärker	157
2.3.4.1	Eigenschaften des idealen Operationsverstärkers	157
2.3.5	Der idealisierte (linearisierte) Operationsverstärker	158
2.3.5.1	Eigenschaften des idealisierten Operationsverstärkers	158
2.3.5.2	Eingangsstörgrößen	160
2.3.6	Der reale Operationsverstärker	161
2.3.6.1	Prinzipieller Aufbau von Operationsverstärkern	162
2.3.7	Das dynamische Verhalten des Operationsverstärkers	163
2.3.7.1	Frequenzkompensation	165
2.3.7.2	Der Einfluß von Anstiegsgeschwindigkeit und Verzögerungszeit	166
2.3.8	OPV-Grundsaltungen	166
2.3.8.1	Die nichtinvertierende Grundsaltung (Elektrometerverstärker)	167
2.3.8.2	Die invertierende Grundsaltung	171
2.3.8.3	Vergleich Elektrometer- und invertierender Verstärker	174
2.3.8.4	Die Additionsschaltung (Summierverstärker)	175
2.3.8.5	Die Subtraktionsschaltung	175
2.3.8.6	Der Integrator	176
2.3.8.7	Der Differentiator	178
2.3.9	Präzisionsverstärker für niederfrequente Spannungen	179
2.3.9.1	Der Zerahackerverstärker (Chopper-Verstärker)	179
2.3.9.2	Der Auto-Zero-Verstärker	181
2.3.10	Breitbandmeßverstärker	182
2.3.10.1	Breitbanddifferenzverstärker	182
2.3.10.2	Current-Feedback-Verstärker	185
2.3.11	Split-Band-Amplifier	186
2.3.12	Literatur	189
2.4	Analoge Meßschaltungen	190
2.4.1	Einleitung	190
2.4.2	Meßverstärker für Spannung und Strom	190
2.4.2.1	Spannungspuffer	190
2.4.2.2	Strompuffer	191
2.4.2.3	Spannungsmeßverstärker-Schaltungen	192
2.4.2.4	Ladungsverstärker	192
2.4.2.5	Instrumentationsverstärker	193
2.4.3	Trennverstärker (Isolationsverstärker)	195
2.4.4	Probleme bei Meßverstärkern	195

2.4.4.1 Fehler durch Eingangsstörgrößen	196
2.4.4.2 Die Eingangsimpedanz	198
2.4.4.3 Rauschen	199
2.4.5 Präzisions-Spannungsquellen	203
2.4.5.1 Spannungsquelle mit Leistungsstufe	204
2.4.6 Präzisions-Stromquellen	206
2.4.7 Nichtlineare Verstärkerschaltungen	208
2.4.7.1 Meßgleichrichter	208
2.4.7.2 Nichtlineare Verstärker mit Knick-Kennlinie	211
2.4.7.3 Logarithmierer	213
2.4.7.4 Exponentierer	216
2.4.8 Analoge Multiplikation und Effektivwertbildung	216
2.4.8.1 Multiplizierer mit Logarithmierern und Exponentierer	216
2.4.8.2 Multiplizierer mit Stromverteilungssteuerung	217
2.4.8.3 Dividierer und Radizierer	218
2.4.8.4 Effektivwert-Gleichspannungs-Konverter	219
2.4.9 Abtast-Halte-Verstärker	220
2.4.10 Phasenselektiver Gleichrichter	223
2.4.11 Literatur	225
2.5 Meßgrößen-Bewertung, Diskriminator, Schwellwertschalter, Schwellwertverstärker	226
2.5.1 Bewertung einer Meßgröße	226
2.5.2 Bezeichnungsweise, Definitionen	228
2.5.3 Zeitkontinuierlich arbeitende Diskriminatoren	229
2.5.3.1 Invertierender Diskriminator	231
2.5.3.2 Nicht-invertierender Diskriminator	232
2.5.3.3 Dynamisches Verhalten	233
2.5.4 Taktgesteuerte Diskriminatoren	233
2.5.5 Literatur	234
2.6 Digitale Zählerbausteine	235
2.6.1 Einleitung	235
2.6.2 Asynchrone Zähler	235
2.6.3 Synchrone Zähler	237
2.7 Digital-Analog-Konverter	239
2.7.1 Grundlagen	239
2.7.2 Kenngrößen von Digital-Analog-Konvertern	240
2.7.3 Ausführungsformen von Digital-Analog-Konvertern	241
2.7.3.1 DAC mit gewichtetem Widerstandsnetzwerk	241
2.7.3.2 DAC mit Widerstands-Kettenleiter	243
2.7.3.3 DAC mit gewichteten Stromquellen	245
2.7.3.4 DAC mit Zwischengröße	246
2.7.4 Literatur	247
2.8 Analog-Digital-Konverter	248
2.8.1 Eigenschaften von Analog-Digital-Konvertern	248

2.8.1.1 Funktionsprinzip	248
2.8.1.2 Arten der Erfassung des Eingangssignals	252
2.8.1.3 Übersicht über ADC-Verfahren	255
2.8.2 Schaltungstechnische Ausführungen wichtiger ADC	255
2.8.2.1 Direkte Konversionsverfahren ohne Rückkopplung	256
2.8.2.2 Kompensationsverfahren mit Rückkopplung	260
2.8.2.3 Indirekte Konversionsverfahren mit Zeit als Zwischengröße	263
2.8.2.4 Indirekte Konversionsverfahren mit Frequenz als Zwischengröße	267
2.8.2.5 Sigma-Delta-Modulator	272
2.8.2.6 Tastverhältnis-Multiplikator ADC (Time-Division-Multiplikator)	277
2.8.3 Literatur	281
2.9 Meßwandler	282
2.9.1 Übersicht	282
2.9.1.1 Idealer Wandler	282
2.9.1.2 Verlustbehafteter Wandler	282
2.9.2 Stromwandler	284
2.9.2.1 Eigenschaften	284
2.9.2.2 Kenngrößen	285
2.9.2.3 Kompensierter Stromwandler	286
2.9.3 Spannungswandler	288
2.9.3.1 Eigenschaften	288
2.9.3.2 Kenngrößen	289
2.9.4 Literatur	290

3. Meßgeräte, Meßmethoden

3.1 Direkte Messung elektrischer Größen.....	291
3.1.1 Einleitung	291
3.1.2 Rückwirkungen, Belastungsfehler	292
3.1.3 Spannungsmessung, Grundsaltungen	295
3.1.4 Mehrbereichs-Spannungsmessung	295
3.1.4.1 Mehrbereichs-Spannungsmessung mit Spannungsmeßwerk	296
3.1.4.2 Mehrbereichs-Spannungsmessung mit Strommeßwerk	297
3.1.5 Messung sehr großer oder sehr kleiner Spannungen	298
3.1.6 Überlastschutz	300
3.1.7 Strommessung, Grundsaltungen	302
3.1.8 Mehrbereichs-Strommessung	303
3.1.8.1 Mehrbereichs-Strommessung mit Spannungsmeßwerk	303
3.1.8.2 Mehrbereichs-Strommessung mit Strommeßwerk	304
3.1.9 Messung sehr kleiner oder sehr großer Ströme	305
3.1.10 Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	309
3.1.10.1 Möglichkeiten der Messung	309
3.1.10.2 Störeinflüsse	309
3.1.10.3 Kompensierter Spannungsteiler	312
3.1.10.4 Tastkopf	314
3.1.11 Temperaturabhängigkeit	316

3.1.12 Direkte Messung von Ohmschen Widerständen	317
3.1.12.1 Getrennte Messung von Strom und Spannung	317
3.1.12.2 Lineare Ohmmessung	317
3.1.12.3 Ratiometrische Widerstandsmessung	319
3.1.12.4 Nichtlineare Ohmmessung	319
3.1.13 Messung extrem großer und extrem kleiner Widerstände	321
3.1.14 Direkte Messung von Kapazität und Induktivität	323
3.1.14.1 Vektorielle Impedanzmessung durch Multiplikation	324
3.1.14.2 Vektorielle Impedanzmessung mit phasenselektiver Gleichrichtung	325
3.1.14.3 Impedanzmessung in der Sensortechnik	325
3.1.15 Messung extrem großer und extrem kleiner L- und C-Werte	326
3.1.15.1 Messung großer Kapazitäten	326
3.1.15.2 Messung großer Induktivitäten	327
3.1.15.3 Messung kleiner Kapazitäten	327
3.1.15.4 Messung kleiner Induktivitäten	328
3.1.16 Literatur	328
3.2 Leistungs- und Energiemessung	329
3.2.1 Leistungsmessung bei Gleichstrom	329
3.2.2 Leistungsmessung bei Wechselstrom	330
3.2.2.1 Wirkleistung	330
3.2.2.2 Blindleistung	335
3.2.3 Leistungsmessung im Drehstromnetz	338
3.2.3.1 Wirkleistung	341
3.2.3.2 Blindleistung	342
3.2.4 Leistungsmessung bei hohen Frequenzen	343
3.2.4.1 Sensoren	343
3.2.4.2 Meßverfahren	344
3.2.5 Energiemessung	345
3.2.6 Literatur	347
3.3 Kompensation und Meßbrücken	348
3.3.1 Meßprinzip und Grundschaltungen	348
3.3.2 Vollständige und teilweise Kompensation von Spannung und Strom	350
3.3.2.1 Vollständige Kompensation von Gleichspannungen	350
3.3.2.2 Teilweise Kompensation von Gleichspannungen	352
3.3.2.3 Die Kompensation von Gleichströmen	352
3.3.3 Gleichspannungsbrücken	353
3.3.3.1 Die Wheatstone-Brücke und ihr Abgleich	353
3.3.3.2 Die Thomson-Brücke	357
3.3.3.3 Ausschlagbrücken	359
3.3.4 Wechselspannungsbrücken	360
3.3.4.1 Allgemeine Behandlung der Wechselspannungsbrücke	360
3.3.4.2 Brücken zur Kapazitäts- und Induktivitätsmessung	362
3.3.4.3 Berücksichtigung von kapazitiven Störeinflüssen	365
3.3.4.4 Zur Konvergenz des Abgleichvorganges	367
3.3.5 Selbstabgleichende Brücken und Kompensatoren	370
3.3.5.1 Selbstabgleichende Präzisionsmeßbrücken	370

3.3.5.2 Selbstabgleichende Kompensatoren	374
3.3.6 Literatur	375
3.4 Zeit- und Frequenzmessung	376
3.4.1 Einleitung	376
3.4.2 Meßmethoden	376
3.4.2.1 Frequenzmessung	377
3.4.2.2 Messung eines Frequenzverhältnisses	377
3.4.2.3 Zeitintervallmessung, Periodendauermessung	378
3.4.2.4 Messung von Phasenverschiebung und Zeitdifferenz	379
3.4.2.5 Messung der Impulsrate, Ereigniszählung	380
3.4.2.6 Auflösung und Meßzeit	380
3.4.3 Funktion und Eigenschaften elektronischer Zähler	382
3.4.3.1 Eingangsstufe	382
3.4.3.2 Referenztaktgenerator	384
3.4.3.3 Einstellbarer Teiler	384
3.4.3.4 Zähler, Anzeige	385
3.4.3.5 Steuerlogik	385
3.4.4 Literatur	385

4. Meßdatenerfassung und Darstellung

4.1 Übersicht und Einführung.....	386
4.1.1 Allgemeine Struktur der Meßdatenerfassung und Darstellung	386
4.1.2 Gegenüberstellung analoger und digitaler Ausführungsformen	387
4.1.3 Weiterführende Behandlung der Digitalisierung	389
4.1.3.1 Abtastung	389
4.1.3.2 Quantisierung	392
4.1.3.3 Alternative Aufzeichnungsarten	393
4.1.4 Gegenüberstellung der Auswertungen im Zeit- und Frequenzbereich	394
4.2 Analogoszilloskopie	395
4.2.1 Grundlagen	395
4.2.2 Kathodenstrahlröhre	397
4.2.3 Horizontalteil	398
4.2.3.1 Zeitbasis	398
4.2.3.2 Triggerung	399
4.2.3.3 Kombinierte Zeitbasis mit einstellbarer Verzögerung	401
4.2.4 Vertikalteil	401
4.2.4.1 Signalverzögerung	403
4.2.4.2 Mehrkanaldarstellung	403
4.2.5 Meßanwendungen und Meßmethoden	406
4.2.5.1 Darstellung zeitabhängiger Vorgänge	406
4.2.5.2 Messung der Phasenverschiebung zweier periodischer Sinus-Signale	407
4.2.5.3 Darstellung von Kennlinien	408
4.2.5.4 Erfassung des Frequenzgangs (Filterkurven, Bode-Diagramm)	410
4.2.6 Sampling-Oszilloskop, Äquivalentzeit-Abtasten	410
4.2.6.1 Grundlagen	410

4.2.6.2	Sequentielles (Triggered) Sampling	411
4.2.6.3	Zufällig gesteuertes (Random) Sampling	412
4.2.6.4	Verfahrensgrenzen	414
4.2.7	Literatur	414
4.3	Digitalspeicheroszilloskop	415
4.3.1	Einleitung	415
4.3.2	Arbeitsweise und Funktionsgruppen	415
4.3.2.1	Analoger Teil der Signalerfassung	416
4.3.2.2	Echtzeitverarbeitung und Aufzeichnung	417
4.3.2.3	Auswertung und Visualisierung	421
4.3.2.4	Trigger	422
4.3.3	Meßwertverarbeitung und Visualisierung	424
4.3.3.1	Darstellung des Signalverlaufes	424
4.3.3.2	Meßfunktionen	427
4.3.3.3	Mathematische Operationen	429
4.3.4	Literatur	429
4.4	Frequenzanalyse	430
4.4.1	Überblick	430
4.4.2	Spektrumanalysator	431
4.4.2.1	Funktionsprinzipien	431
4.4.2.2	Spektralanalyse nach dem Prinzip des Überlagerungsempfängers	431
4.4.3	FFT-Analysator	434
4.4.3.1	Funktionsweise	434
4.4.3.2	Erfassung des Eingangssignals	435
4.4.3.3	Aufbereitung und Auswertung	437
4.4.3.4	Einfluß der Länge der Fensterfunktion	439
4.4.3.5	Synchrone und asynchrone Aufzeichnung	440
4.4.3.6	Die Form der Fensterfunktion und analytische Korrekturen	441
4.4.4	Literatur	443
4.5	Computergestützte Meßtechnik	444
4.5.1	Einleitung	444
4.5.2	Hardware	445
4.5.3	Schnittstellen	446
4.5.3.1	Analoge Schnittstellen	446
4.5.3.2	Digitale Schnittstellen	446
4.5.4	Software	449
4.5.4.1	Funktionen der Software	449
4.5.4.2	Möglichkeiten der Erstellung	450
4.5.5	Literatur	451
	Wichtigste Formelzeichen und Abkürzungen	452
	Symbole und Schreibweisen	454
	Index	455