

Wolf-Jürgen Becker, Karl Walter Bonfig, Klaus Höing (Hrsg.)

Handbuch Elektrische Meßtechnik

2., überarbeitete Auflage



Hüthig Verlag Heidelberg

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
I Grundlagen	1
1.1 Allgemeines	1
1.1.1 Einführung	1
1.1.1.1 Was heißt messen?	1
1.1.1.2 Was wird gemessen und warum?	1
1.1.2 Meßtechnische Größen	2
1.1.2.1 Historisches	2
1.1.2.2 MKS-, MKSA- und MKSAK-System	2
1.1.2.3 Das Internationale Einheitensystem (SI) und die heute gültigen Basiseinheiten	3
1.1.2.4 Grundbegriffe	6
1.1.3 Meßkette und Grundstrukturen von Meßsystemen	7
1.1.3.1 Serien- oder Kettenstruktur	8
1.1.3.2 Parallelstruktur	8
1.1.3.3 Kreisstruktur	9
1.1.4 Einteilung der Meßverfahren	10
1.1.4.1 Ausschlag- und Kompensationsverfahren	10
1.1.4.2 Indirekte und direkte Verfahren	11
1.1.4.3 Analoge und digitale Meßverfahren	12
1.2 Kenngrößen von Meßsystemen	13
1.2.1 Statische Kenngrößen und Kennlinien	13
1.2.2 Allgemeine meßtechnische Charakteristiken	13
1.2.3 Übliche Toleranzbänder	16
1.2.4 Dynamische Kenngrößen	18
1.3 Meßfehler und Fehlerrechnung	20
1.3.1 Fehlerbegriffe und -arten	20
1.3.2 Statische Meßfehler	22
1.3.3 Dynamische Meßfehler	22
1.3.4 Grobe Meßfehler	24

1.3.5	Systematische Meßfehler	24
1.3.6	Zufällige Meßfehler	26
1.3.7	Meßwertstatistik	27
1.3.7.1	Mittelwert, Varianz, Standardabweichung	27
1.3.7.2	Häufigkeitsdichte, Summenhäufigkeit	29
1.3.7.3	Normalverteilung (Gauß-Verteilung)	32
1.3.7.4	Meßunsicherheit bei zufälligen Fehlern	33
1.3.8	Fehlerkorrektur	35
1.3.8.1	Fehlerkompensation	36
1.3.8.2	Abschirmung der Störeinflüsse	37
1.3.8.3	Signalfilterung	37
1.3.9	Fehlergrenzen von Meßgeräten	38
1.3.10	Fehlerfortpflanzung	40
2	Meßsignalverarbeitung	45
2.1	Meßkette	45
2.2	Meßgrößenerfassung	48
2.3	Meßgrößenumformung	50
2.3.1	Meßverstärkerschaltungen	50
2.3.1.1	Idealer Meßverstärker	51
2.3.1.2	Realer Meßverstärker	52
2.3.1.3	Gegenkopplung	54
2.3.1.4	Meßverstärkergrundlagen	55
2.3.1.5	Meßbrückenschaltung	65
2.3.1.6	Abgleichverfahren	68
2.3.1.7	Ausschlagverfahren	69
2.3.2	Analoge Filterschaltungen	70
2.4	Digitale Meßtechnik	76
2.4.1	Grundlagen, Quantisierung, Codierung	76
2.4.2	Analog-Digital-Umsetzer	79
2.4.2.1	Direkt umsetzende Analog-Digital-Umsetzer	80
2.4.2.2	Nicht direkt umsetzende Analog-Digital-Umsetzer	84
2.4.2.3	Integrierende Umsetzverfahren	86
2.4.2.4	Fehler bei Analog-Digital-Umsetzern	91
2.4.3	Einfache digitale Meßgeräte	92
2.4.3.1	Digitalvoltmeter	92
2.4.3.2	Zeit- und Periodendauermessung	93
2.4.3.3	Frequenzmessung	93
2.4.3.4	Verhältniszählverfahren	94
2.4.4	Meßkette bei digitaler Meßsignalverarbeitung	95
2.4.5	Programmpakete	95

2.5	Ausgabegeräte	97
2.5.1	Analoge Ausgabe	97
2.5.1.1	Begriffsbestimmung	97
2.5.1.2	Skalananzeigen	97
2.5.1.3	Bauarten und Bewertung analoger Ausgabegeräte	98
2.5.2	Digitale Ausgabe	99
2.5.2.1	Begriffsbestimmung und Analog-Digital-Umsetzung	99
2.5.2.2	Digitale Ausgabe mit Lumineszenzdioden	99
2.5.2.3	Digitale Ausgabe mit Flüssigkristall-Displays	99
2.5.2.4	Digitale Ausgabe mit Elektrolumineszenz-Displays	100
2.5.2.5	Digitale Ausgabe mit Vakuumfluoreszenz-Displays	100
2.5.2.6	Digitale Ausgabe mit Plasma-Displays	101
2.5.2.7	Bewertung digitaler Ausgabegeräte	101
2.5.3	Datensichtgeräte	101
2.5.3.1	Begriffsbestimmung	102
2.5.3.2	Informationsdarstellung und Rechneransteuerung	102
2.5.4	Drucker	102
2.5.4.1	Aufschlagende Drucker	102
2.5.4.2	Aufschlagfreie Drucker	103
2.5.4.3	Vergleich von Aufschlagdruckern mit aufschlagfreien Druckern	103
2.5.4.4	Vollzeichen- und Matrixdrucker	104
2.5.4.5	Serielle Drucker, Zeilendrucker, Seitendrucker	104
2.5.5	Plotter	107
2.5.5.1	Computergraphik am graphischen Arbeitsplatz	107
2.5.5.2	Verschiedene Plot-Verfahren	108
2.5.5.3	Vergleich der verschiedenen Plottertypen	110
2.5.6	Schreiber	111
2.5.6.1	Punkt- und Linienschreiber	112
2.5.6.2	Kompensationsschreiber	113
2.5.6.3	Vergleich der verschiedenen Schreibertypen	113
2.5.6.4	Integration von PC-Funktionen im Schreiber	113
2.5.6.5	Ausblick auf den Schreibermarkt	114
2.5.7	Benutzerschnittstelle und Rechnerankopplung	115
2.5.7.1	Benutzerschnittstelle	115
2.5.7.2	Rechnerankopplung	116
2.6	Mathematische Methoden der Meßsignalerfassung und -verarbeitung	118
2.6.1	Statistische Methoden	120
2.6.2	Ausgleichsrechnung	126
2.6.2.1	Ausgleichsgerade	126
2.6.2.2	Ausgleichspolynom	128
2.6.2.3	Spline-Interpolation	129

2.6.2.4	Spline-Approximation	129
2.6.2.5	Approximation periodischer Signale durch Fourier-Reihen	130
2.6.2.6	Approximation durch Exponentialfunktionen	131
2.6.2.7	Approximation durch gebrochen-rationale Funktionen	132
2.6.3	Fourier-Transformation, Schnelle Fourier-Transformation (Fast Fourier Transform FFT)	133
2.6.3.1	Fourier-Transformation	133
2.6.3.2	Schnelle Fourier-Transformation (FFT)	136
2.6.3.3	Diskrete Fourier-Transformation	137
2.6.4	Digitale Filter	139
2.6.4.1	Nichtrekursive Filter	139
2.6.4.2	Entwurf nichtrekursiver Filter	140
2.6.4.3	Approximation des idealen Tiefpasses	140
2.6.4.4	Gibbssches Phänomen	140
2.6.4.5	Abtastfrequenz	141
2.6.4.6	Umwandlung eines Tiefpasses in andere Filtertypen	141
2.6.4.7	z-Transformation	142
2.6.4.8	Rekursive Filter	142
2.6.4.9	Übertragungsfunktion	143
2.6.4.10	Filterarten	144
2.6.4.11	Filter höherer Ordnung	144
2.6.4.12	Diskrete Faltung	145
2.6.5	Korrelationsmethoden	146
2.6.6	Fuzzy-Logik in der Meßtechnik	152
2.6.7	Neuronale Netze in der Meßtechnik	157
2.6.8	Neuro-Fuzzy in der Meßtechnik	162
2.6.9	Expertensysteme, künstliche Diagnose	166
2.6.10	Zuverlässigkeit	168

3 Anwendungsgebiete und Applikationen 171

3.1	Bestimmung von Basisgrößen	171
3.1.1	Elektrische Größen	171
3.1.1.1	Strommessung	171
3.1.1.1.1	Direkte Meßverfahren	171
3.1.1.1.2	Stromkompensation	175
3.1.1.2	Spannungsmessung	175
3.1.1.2.1	Direkte Meßverfahren	175
3.1.1.2.2	Spannungskompensation	178
3.1.1.3	Wechselstrom und Wechselspannung	180
3.1.1.4	Widerstand, Impedanz	184
3.1.1.5	Leistung	190
3.1.1.6	Zeit, Periodendauer und Frequenz	192
3.1.1.7	Phasenwinkel	195

3.1.1.8	Meßgeräte	196
3.1.1.8.1	Vielfachinstrument	196
3.1.1.8.2	Digitalmultimeter	197
3.1.1.8.3	Analogoszilloskop	198
3.1.2	Magnetische Feldgrößen	203
3.1.2.1	Magnetische Feldstärke	203
3.1.2.2	Magnetische Flußdichte	204
3.1.2.3	Permeabilität, Hysteresekurve	205
3.1.2.4	Magnetische Spannung, magnetischer Fluß	207
3.1.2.5	Messung magnetischer Größen	207
3.1.3	Elektrische Feldgrößen	217
3.1.3.1	Elektrische Feldstärke	217
3.1.3.2	Elektrische Flußdichte	218
3.1.3.3	Dielektrische Funktion	220
3.1.3.4	Messung elektrischer Feldgrößen	222
3.1.4	Optische Größen	227
3.1.4.1	Optische Leistung	227
3.1.4.2	Wellenlänge	230
3.2	Messung, Modellierung und Simulation von Bauelementen und Schaltungen	234
3.2.1	Vorüberlegungen	234
3.2.1.1	Meßtechnische Vorüberlegungen zur Modellierung	235
3.2.1.2	Bedeutung des De-Embeddings für die Modellierung eines Transistors	243
3.2.2	Passive (lineare) Bauelemente	245
3.2.2.1	Diskrete passive Bauelemente	245
3.2.2.1.1	Beispiel: Kondensator	245
3.2.2.1.2	Beispiel: Steckermodellierung	247
3.2.2.2	Testfassung zur Messung gehäuster Bauelemente	248
3.2.2.3	Gehäusemodellierung für diskrete Transistoren	251
3.2.3	Aktive analoge (nichtlineare) Bauelemente	254
3.2.3.1	Bauelementetypen	254
3.2.3.2	Messungen zur Charakterisierung	254
3.2.3.3	Modellierung und Parameterextraktion nichtlinearer Bauelemente ...	255
3.2.3.3.1	Diode	257
3.2.3.3.2	Weitere aktive Bauelemente	262
3.2.3.4	Temperaturverhalten	264
3.2.3.5	Faktoranalyse	266
3.2.4	Analoge ICs	268
3.2.4.1	IC-Gehäusemodellierung	268
3.2.4.2	Beispiel: Operationsverstärker	269
3.2.5	Simulationstechniken zum Systementwurf	273
3.2.5.1	Diskrete Time-Envelope-Analyse	274

3.2.5.2	Fast-Fourier-Transformation; Signal- und Rauschanalyse	275
3.2.5.3	Klein- und Großsignal-Systemsimulation im Frequenzbereich (eingeschwungener Zustand)	276
3.2.5.4	Systemsimulation: $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK-Modulation	278
3.2.6	Simulationstechniken zum Schaltungsentwurf	283
3.2.6.1	Transientenanalyse (SPICE)	283
3.2.6.2	Dynamische Konvolutions-Simulationstechnik (Impulsverfahren) ..	284
3.2.6.3	Kleinsignal-Simulation im Frequenzbereich (eingeschwungener Zustand)	285
3.2.6.4	Großsignal-Simulation im Frequenzbereich im eingeschwungenen Zustand (harmonic balance)	286
3.2.6.5	Statistischer Schaltungsentwurf und Optimierung (Yield-Analyse) ..	287
3.2.6.6	Elektromagnetische Simulation	289
3.2.6.6.1	2D-Simulation (Momentenmethode)	289
3.2.6.6.2	3D-Simulation (Finite-Elemente-Methode)	292
3.2.7	Digital-Analog-Umsetzer	294
3.2.7.1	Statische Eigenschaften	295
3.2.7.2	Dynamische Eigenschaften	299
3.2.7.3	Messungen der Eigenschaften	299
3.2.7.4	Simulation	301
3.2.8	Analog-Digital-Umsetzer	303
3.2.8.1	Statische Eigenschaften	303
3.2.8.2	Dynamische Eigenschaften	306
3.2.8.3	Messung der statischen Eigenschaften	309
3.2.8.4	Dynamische Messungen	311
3.2.8.5	Simulation von A/D-Umsetzern	312
3.2.9	Digitale ICs	314
3.2.9.1	Fehlerursachen	314
3.2.9.2	Gatter	316
3.2.9.3	Test komplexer digitaler Schaltungen	319
3.2.9.4	Fehlersimulation und Fehlermodelle	321
3.2.9.5	Teststrategien	325
3.2.9.5.1	Scan-Path-Methode	325
3.2.9.5.2	Boundary-Scan-Verfahren	327
3.2.9.5.3	BIST-Verfahren	329
3.2.9.5.4	BILBO-Register	337
3.2.9.5.5	IDDQ-Testverfahren	338
3.2.9.6	Mikroprozessoren	341
3.2.9.7	Speicher	343
3.2.9.8	Messung und Charakterisierung von Bauteilparametern	344
3.2.9.9	Digitaltestsysteme	347
3.2.9.10	Simulation	350
3.2.10	Komplexe gemischt-analog/digitale integrierte Schaltungen	352
3.2.10.1	LSI-Testsysteme für gemischt-analog/digitale ICs	354

3.2.10.2	Testverfahren	355
3.2.10.3	Testentwicklungsprozeß und Testprogramme	359
3.3	Messen in der Digitaltechnik	362
3.3.1	Hardware	362
3.3.1.1	Hardware-Diagnosewerkzeuge	362
3.3.1.1.1	Pulsgenerator	365
3.3.1.1.2	Digitaloszilloskop	368
3.3.1.1.3	Universalzähler	377
3.3.1.1.4	Logikanalysatoren	381
3.3.1.1.5	Pattern-Generator	384
3.3.1.2	Diagnose und Ursache von Bit-Fehlern	386
3.3.1.2.1	Serielle digitale Übertragungssysteme und Entstehung von Bit-Fehlern	387
3.3.1.2.2	Ursachen von Bit-Fehlern	388
3.3.1.2.3	Maßzahl für Bit-Fehler	392
3.3.1.2.4	Meßeinrichtungen für Bit-Fehler	392
3.3.2	Software-Entwicklungs- und -Diagnose-Tools	394
3.3.2.1	Einführung in das Software-Engineering	395
3.3.2.2	Prinzipien	396
3.3.2.3	Methoden und Techniken	398
3.3.2.4	Analyse, Design, Implementation und Test	400
3.3.2.5	Analyse- und Design-Prozeß	400
3.3.2.6	Entwurf	411
3.3.2.7	Implementation	413
3.3.2.8	Optimierung	416
3.3.3	Integration von Hardware und Software	417
3.3.3.1	Komponenten eines integrierten Testsystems	418
3.3.3.2	Testanordnung und Fehlerdiagnose	418
3.3.3.3	Trigger-Bedingungen	420
3.3.3.4	Zukunftsorientierte Testumgebungen	422
3.4	Software-orientierte Meßsysteme	425
3.4.1	Aufgabenstellung	425
3.4.1.1	Einsatzbereiche	426
3.4.1.2	Systembewertung	426
3.4.2	Konzepte	428
3.4.2.1	Modularer Funktionsumfang und dezentraler Aufbau	428
3.4.2.2	Digitalisierung analoger Meßgrößen	429
3.4.2.3	Systeminterne Verarbeitung und Datenübertragung	430
3.4.2.4	Zeitverhalten des Meßsystems	431
3.4.3	Zusammenstellung eines Rechnermeßsystems	433
3.4.3.1	Rechner und Betriebssysteme	434

3.4.3.2	Einsteckkarten für die Meßwerterfassung	436
3.4.3.3	Digitale Meßgeräte	438
3.4.3.4	Schnittstellen für die Geräteanbindung	438
3.4.4	Meßtechnikprogramme und Entwicklungswerkzeuge	443
3.4.4.1	Funktionen eines Meßtechnikprogramms	443
3.4.4.2	Visualisierung	444
3.4.4.3	Standardprogrammiersprachen und Funktionsbibliotheken	445
3.4.4.4	Virtuelle Instrumente	446
3.4.4.5	Graphische Entwicklungswerkzeuge	447
3.5	NF-Meßtechnik	453
3.5.1	Grundbegriffe	453
3.5.1.1	Klassifizierung von Signalen	453
3.5.1.2	Darstellung analoger Signale im Zeit- und Frequenzbereich	454
3.5.1.3	Systembeschreibung, Übertragungsfunktion und Frequenzgang ...	456
3.5.1.4	Pegel und Dämpfung	460
3.5.2	Passive NF-Komponenten	463
3.5.2.1	Impedanzen, Admittanzen, Reaktanzzweipole	463
3.5.2.2	Anpassungsglieder, Dämpfungsglieder und Phasenschieber	463
3.5.2.3	Zweitore	469
3.5.2.4	Leitungen	473
3.5.2.5	Siebschaltungen	476
3.5.3	Aktive NF-Komponenten	478
3.5.3.1	Verstärker	478
3.5.3.2	Sende- und Empfangsverstärker	483
3.5.3.3	Oszillatoren	484
3.5.3.4	Mischer	486
3.5.3.5	Modulatoren	487
3.5.3.6	Demodulatoren	491
3.5.3.7	Filter	494
3.5.4	NF-Meßgeräte und Meßverfahren	497
3.5.4.1	Pegel- und Dämpfungsmessungen	497
3.5.4.2	Impedanz- und Reflexionsfaktormessung	504
3.5.4.3	Leistungsmessung	507
3.5.4.4	Klirrfaktormessung	509
3.5.4.5	Differenztonfaktor- und Intermodulationsfaktormessung	510
3.5.4.6	Messung des Signal-Rausch-Verhältnisses und der Rauschzahl ...	511
3.5.4.7	Spektrum- und Netzwerkanalyse	513
3.5.5	Modulationsmessungen	516
3.5.5.1	Amplitudenmodulation	516
3.5.5.2	Messung von Frequenz- und Phasenhub	518

3.6	HF-Meßtechnik (10 MHz – 1 GHz)	519
3.6.1	Besonderheiten der HF-Meßtechnik	519
3.6.1.1	Strom	519
3.6.1.2	Spannung	521
3.6.1.3	Leistung	523
3.6.1.4	Phase, Gruppenlaufzeit	525
3.6.2	HF-Komponenten	527
3.6.2.1	Impedanz	527
3.6.2.2	Leitung	530
3.6.2.3	Filter, Resonator	530
3.6.2.4	Verstärker	531
3.6.2.5	Mischer	534
3.6.2.6	Tuner, Frequenzumsetzer	535
3.6.2.7	Modulator, Demodulator	537
3.6.2.8	Oszillator	538
3.6.3	Modulation	540
3.6.3.1	Sinusträger / Analoges Informationssignal	541
3.6.3.2	Sinusträger / Digitales Informationssignal	543
3.6.3.3	Uncodierte Pulsträger	545
3.6.3.4	Codierte Pulsträger	546
3.6.3.5	Analyseverfahren für die Amplitudenmodulation	547
3.6.3.6	Analyseverfahren für die Frequenzmodulation	551
3.6.3.7	Analyseverfahren für die Phasenmodulation	553
3.6.3.8	Analyseverfahren für Modulationsarten mit analogem Träger und digitalem Informationssignal	553
3.6.3.9	Analyseverfahren für Modulationsarten mit Pulsträger	557
3.6.4	Rauschen	558
3.6.4.1	Rauschkenngrößen	559
3.6.4.2	Antennenrauschen	564
3.6.4.3	Zweitorrauschen	565
3.6.4.4	Signal-Rausch-Verhältnis	570
3.6.4.5	Verstärkerrauschen	572
3.6.4.6	Phasenrauschen	573
3.7	Meßtechnik für Frequenzen oberhalb 1 GHz	578
3.7.1	Höchstfrequenzkomponenten	578
3.7.1.1	Impedanz, Dämpfungsglieder, Phasenschieber	578
3.7.1.2	Koaxiale Leitungen	579
3.7.1.3	Hohlleiter	580
3.7.1.4	Planare Leitungen	580
3.7.1.5	n -Tore	581
3.7.1.6	Filter und Resonatoren	582
3.7.1.7	Verstärker	583

3.7.1.8	Mischer	586
3.7.1.9	Frequenzumsetzer	588
3.7.1.10	Modulator	588
3.7.1.11	Demodulator	589
3.7.1.12	Halbleiterbauelemente	589
3.7.1.13	Oszillatoren	591
3.7.1.14	Repeater und Regeneratoren	593
3.7.2	Höchstfrequenzmessungen	594
3.7.2.1	Leistungsmessung	594
3.7.2.1.1	Sensorentypen	595
3.7.2.1.2	Leistungsmeßgeräte für moderne Sensoren	596
3.7.2.2	Hoch- und Höchstfrequenzsignalgeneratoren	598
3.7.2.2.1	Wobbelgenerator	599
3.7.2.2.2	Synthesizer	600
3.7.2.2.3	Ausgangssignal	604
3.7.2.2.4	Stabilität	606
3.7.2.2.5	Applikationen	609
3.7.2.3	Rauschmessung	611
3.7.2.3.1	Rauschquelle	611
3.7.2.3.2	Meßmethoden	611
3.7.2.4	Spektrumanalyse	615
3.7.2.4.1	Spektrumanalysatoren	615
3.7.2.4.2	Applikationen	619
3.7.2.5	Netzwerkanalyse	623
3.7.2.5.1	Netzwerkanalysatoren	623
3.7.2.5.2	Übertragungsmessungen	628
3.7.2.5.3	Reflexionsmessung	631
3.7.2.5.4	S-Parameter	633
3.7.2.5.5	Fehlermodell	635
3.7.2.5.6	Kalibrierung und Fehlerkorrektur	637
3.7.2.5.7	Messungen im Zeitbereich	641
3.7.3	Modulationsmessung	648
3.7.3.1	Überblick	648
3.7.3.2	Meßtechnik	648
3.7.3.2.1	Grundbegriffe	648
3.7.3.2.2	Vektormodulator	649
3.7.3.2.3	Vektordemodulator	650
3.7.3.2.4	I/Q -Daten-Auswertung	652
3.7.4	Feldmessungen	655
3.7.4.1	Feldstärkemessung	655
3.7.4.2	Interferenzfeldmessung	659
3.7.4.3	Wellentransmissionsmessung	662
3.7.4.4	Wellenreflexionsmessung	664
3.7.4.5	Antennenmessung	666

3.8	Lichtwellenleitung	670
3.8.1	Einführung	670
3.8.2	Physikalische Grundbegriffe	671
3.8.2.1	Das elektromagnetische Spektrum	671
3.8.2.2	Brechung und Reflexion	672
3.8.2.3	Streuung und Absorption	673
3.8.2.4	Lichtausbreitung in der Faser	674
3.8.3	Lichtwellenleitertypen	675
3.8.3.1	Stufenprofil-LWL als Multimode-LWL	676
3.8.3.2	Gradientenprofil-LWL	677
3.8.3.3	Stufenprofil-LWL als Monomode-LWL	678
3.8.4	Kopplung von LWL-Komponenten	679
3.8.4.1	Kopplung eines optischen Senders an einen LWL	679
3.8.4.2	Kopplung eines optischen Empfängers an einen LWL	682
3.8.4.3	Koppeloptiken	683
3.8.4.4	Kopplung von LWL und LWL	683
3.8.5	Übertragungssysteme und Parameter	685
3.8.6	Parameter des Lichtwellenleiters	691
3.8.6.1	Strahlengeometrische Kennwerte	691
3.8.6.1.1	Feldradius, Grenzwellenlänge	691
3.8.6.1.2	Nahfeld, Brechzahlprofil	693
3.8.6.1.3	Fernfeld, numerische Apertur	694
3.8.6.2	Faserdämpfung	695
3.8.6.3	Polarisation	699
3.8.6.4	Polarisationsabhängige Dämpfung	705
3.8.6.5	Dispersionseffekte und Faserbandbreite	711
3.8.6.5.1	Methoden zur Messung der Multimoden-Bandbreite	712
3.8.6.5.2	Methoden zur Messung der Dispersionseffekte bei Einzelmodenfasern	713
3.8.6.6	Geometrische und mechanische Kenngrößen	724
3.8.7	Faseroptische Kenngrößen	727
3.8.7.1	Optische Leistungsmessung	727
3.8.7.2	Fehlersuche auf Übertragungsstrecken	732
3.8.8	Charakterisierung der optischen Bauelemente	737
3.8.8.1	Optisches Spektrum von Lichtquellen	737
3.8.8.2	Optische Empfänger	744
3.8.8.3	Optische Verstärker	748
3.8.8.4	Passive Komponenten	752
3.8.8.4.1	Tormodell	752
3.8.8.4.2	LWL-optische Stecker	754
3.8.8.4.3	Koppler	756
3.8.8.4.4	Wellenlängenmultiplexer und -demultiplexer	757
3.8.8.4.5	Dämpfungsglieder	759
3.8.8.4.6	Optische Isolatoren	759

3.9	Telekommunikation	762
3.9.1	Datenkommunikation mittels LAN (< 10 km)	762
3.9.1.1	Konzepte	762
3.9.1.1.1	ISO/OSI-Referenzmodell	762
3.9.1.1.2	LAN	763
3.9.1.1.3	Ethernet	766
3.9.1.1.4	Token-Ring	770
3.9.1.1.5	FDDI	772
3.9.1.1.6	ATM	773
3.9.1.2	Übertragungstechnik	774
3.9.2	Datenkommunikation mittels WAN (> 10 km)	777
3.9.2.1	Konzepte	777
3.9.2.2	Leitungsvermittelte Dienste	777
3.9.2.2.1	Datex-L-Netz mit X.21	777
3.9.2.2.2	ISDN mit Universalanschlüssen	778
3.9.2.3	Paketvermittelte Dienste	778
3.9.2.3.1	Datex-P-Netz mit X.25	778
3.9.2.3.2	Frame-Relay-Dienste (Rahmenvermittlungsdienste)	779
3.9.2.3.3	Breitband-ISDN	780
3.9.2.4	Übertragungstechnik	780
3.9.2.4.1	PDH-Netzwerk	780
3.9.2.4.2	SDH-Netzwerk	783
3.9.2.4.3	ATM	789
3.9.2.4.4	B-ISDN	789
3.9.3	Mobilkommunikation	792
3.9.3.1	GSM-Netzwerk	792
3.9.3.1.1	GSM-Netzwerk und Luftschnittstelle	793
3.9.3.1.2	Rahmenstruktur	797
3.9.3.2	Physikalischer Aufbau	798
3.9.3.2.1	Modulationsverfahren	798
3.9.3.2.2	Zeitmultiplex- und Frequenzmultiplexverfahren	799
3.9.3.2.3	Adaptives Leistungsverhalten	802
3.9.3.2.4	Ausgangsspektrumsmessung	803
3.9.3.2.5	Sprachcodierung und Fehlerschutz	803
3.9.3.3	Bündelfunk	805
3.9.3.3.1	Bündelfunksystem	805
3.9.3.3.2	Implementierung des MPT 1327-Standards	806
3.9.3.3.3	Protokollstruktur	806
3.9.3.3.4	Meßtechnik	807
3.10	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	816
3.10.1	EMV-Normen	817
3.10.2	EMV-Messungen	819

3.10.2.1	Freifeld	819
3.10.2.2	Schirmkabinen	819
3.10.3	EMV-Meßempfänger	820
3.10.4	Emissionsmessungen	824
3.10.5	Immunitätsprüfungen	826
3.10.6	HF-Störfestigkeitsprüfung (EMS gestrahlt)	826
3.10.7	Alternative Testumgebungen	829
3.10.7.1	TEM-Zelle	829
3.10.7.2	GTEM-Zelle	830
3.10.8	HF-Störfestigkeitsprüfung (EMS geleitet)	831
3.10.9	Elektrostatische Entladung	832
3.10.10	Blitzstoß (surge)	834
3.10.11	Schnelle elektrische Transienten (EFT, electrical fast transient), Burst	836
3.10.12	Netzausfälle und -schwankungen	838
3.10.13	Zuständige Behörden nach der EMV-Richtlinie 89/336/EWG	839
3.11	Elektronikfertigung	845
3.11.1	Fertigungsprozesse und Fehlererkennung	845
3.11.2	Baugruppentest	850
3.11.2.1	Prozeßtest	850
3.11.2.2	Funktionstest	851
3.11.3	Nichtelektrische Verfahren beim Baugruppentest	852
3.11.3.1	Röntgen	852
3.11.3.1.1	Allgemeines zur Röntgen-Technik in der Leiterplattenfertigung ..	852
3.11.3.1.2	Lötstelleninspektion mit Röntgen-Strahlen	854
3.11.3.1.3	Weitere Einsatzgebiete der Röntgentechnik bei der Leiterplattenproduktion	858
3.11.3.1.4	Vor- und Nachteile	858
3.11.3.2	Optische Verfahren	858
3.11.3.2.1	Grau- und Farbbildverarbeitung	859
3.11.3.2.2	Triangulationsverfahren	859
3.11.3.2.3	Lichtschnittverfahren	860
3.11.3.2.4	Lotpastenauftrag	860
3.11.3.2.5	Vollständigkeitskontrolle, Bauteilidentifikation	861
3.11.3.2.6	Lötstellenkontrolle	861
3.11.3.2.7	Thermographie und thermische Analyse	861
3.11.3.2.8	Überprüfung von Anzeigeeinheiten	862
3.11.4	Elektrische Verfahren	863
3.11.4.1	In-Circuit-Test	863
3.11.4.1.1	Analoger In-Circuit-Test	863
3.11.4.1.2	Digitaler In-Circuit-Test	864
3.11.4.1.3	Funktionstest	865
3.11.4.2	Boundary-Scan	865

3.11.5	Testsystemaufbau und Bus-Systeme	867
3.11.5.1	Testsystemaufbau	867
3.11.5.2	Busse für Testsysteme	868
3.11.5.2.1	IEEE-488	868
3.11.5.2.2	PCbus	870
3.11.5.2.3	VMEbus	870
3.11.5.2.4	VXibus	871
3.11.5.2.5	Local Area Networks, LAN-Meßgeräte-Server	873
3.11.6	Interface-Bus, Programmierstandards	875
3.11.6.1	IEEE-488.2	875
3.11.6.2	SCPI	876
3.11.6.3	Standardisierungen in der Eingabe-/Ausgabe-Programmierung	878
3.11.7	Überwachung der Prozeßstabilität	880
3.12	Energie- und Hochspannungsmesstechnik	886
3.12.1	Messung hoher Spannungen	886
3.12.1.1	Messung hoher Gleichspannungen	886
3.12.1.2	Messung hoher Wechselspannungen	889
3.12.1.3	Messung von Stoßspannungen	894
3.12.2	Messung hoher Stromstärken	898
3.12.2.1	Niederohmige Meßwiderstände	898
3.12.2.2	Magnetischer Spannungsmesser (Rogowski-Spule)	900
3.12.3	Elektromagnetische Verträglichkeit	901
3.12.3.1	Allgemeines	901
3.12.3.2	EMV und Hochspannungstechnik	901
3.12.3.3	EMV-Maßnahmen	902
3.12.4	Teilentladungsmesstechnik	903
3.12.4.1	Grundlagen	903
3.12.4.2	Physikalische Vorgänge bei Teilentladungen	904
3.12.4.3	Form und Eigenschaften der TE-Impulse	905
3.12.4.4	* Messung der scheinbaren Ladung	906
3.12.4.5	TE-Messung an physikalisch ausgedehnten Anordnungen	907
3.12.5	Schirmung und Filterung	908
3.12.5.1	Allgemeines	908
3.12.5.2	Störquellen und Störübertragungswege am Beispiel einer elektrischen TE-Messung	908
3.12.5.3	Schirmungsbedarf	909
3.12.5.4	Berechnung von Schirmungen	910
3.12.6	Dielektrische Messungen	914
3.12.6.1	Reihen- und Parallelersatzschaltbild verlustbehafteter Kondensatoren	914
3.12.6.2	Brückenschaltungen zur Messung von Kapazitäten und Verlustfaktoren	916

Anhang

A.1	Autorenverzeichnis	923
A.2	Internet-Adressen	925
A.3	Stichwortverzeichnis	927
A.4	Deutsche Fachbegriffe und ihre englische Entsprechung	940
A.5	Englische Fachbegriffe und ihre deutsche Entsprechung	946
A.6	Fachbegriffe und ihre Abkürzung	952
A.7	Abkürzungen und ihre Bedeutung	955

1.1 Allgemeine Grundlagen

1.1.1 Einführung

1.1.1.1 Was macht man bei der MS?

Beim ersten Blick auf den Computer wird man von der Vielzahl der Möglichkeiten beeindruckt. Die Zahl der Möglichkeiten ist so groß, dass man sich nicht vorstellen kann, dass man alle Möglichkeiten ausnützen kann. Die Möglichkeiten sind so vielfältig, dass man sich nicht vorstellen kann, dass man alle Möglichkeiten ausnützen kann. Die Möglichkeiten sind so vielfältig, dass man sich nicht vorstellen kann, dass man alle Möglichkeiten ausnützen kann.

1.1.1.2

1.1.1.3 Was wird gemacht und warum?

Die bei der MS sind so vielfältig, dass man sich nicht vorstellen kann, dass man alle Möglichkeiten ausnützen kann. Die Möglichkeiten sind so vielfältig, dass man sich nicht vorstellen kann, dass man alle Möglichkeiten ausnützen kann. Die Möglichkeiten sind so vielfältig, dass man sich nicht vorstellen kann, dass man alle Möglichkeiten ausnützen kann.

1.1.1.1 Was wird gemacht und warum?

Nicht nur bei der MS sind so vielfältig, dass man sich nicht vorstellen kann, dass man alle Möglichkeiten ausnützen kann. Die Möglichkeiten sind so vielfältig, dass man sich nicht vorstellen kann, dass man alle Möglichkeiten ausnützen kann. Die Möglichkeiten sind so vielfältig, dass man sich nicht vorstellen kann, dass man alle Möglichkeiten ausnützen kann.