

Reinhard Lerch

Elektrische Messtechnik

Analoge, digitale
und computergestützte Verfahren

5., neu bearbeitete Auflage

Mit 532 Abbildungen und 64 Tabellen sowie DVD

4y Springer

Inhaltsverzeichnis

Umfang und Bedeutung der Elektrischen Meßtechnik	1
1.1 Zur Historie und Bedeutung der Meßtechnik	1
1.2 Der Begriff des Messens	3
1.3 Begriffsdefinitionen in der Meßtechnik	4
1.3.1 Allgemeine Begriffe	4
1.3.2 Meßgerät und Meßeinrichtung	5
1.3.3 Meßkette (Struktur einer elektrischen Meßeinrichtung)	5
1.4 Vorschriften und Normen	6
1.5 Klassifizierung von Meßmethoden	7
1.5.1 Ausschlagmethode - Kompensationsmethode	7
1.5.2 Analog - Digital	8
1.5.3 Kontinuierlich - Diskontinuierlich	8
1.5.4 Direkt - Indirekt	9
1.6 Die Informationsträger im Meßsignal	9
Die Grundlagen des Messens	11
2.1 Maßsysteme. Einheiten, Naturkonstanten	11
2.1.1 Maßsysteme	Tr. 11
2.1.2 Naturkonstanten	13
2.1.3 Abgeleitete Einheiten	13
2.2 Größen- und Zahlenwertgleichungen	13
Ausgleichsvorgänge, Frequenz-Transformation und Vierpol-Übertragungsverhalten	17
3.1 Fourier-Transformation	17
3.2' Ausgleichsvorgänge in linearen Netzwerken	21
3.3 Die Laplace-Transformation	24
3.4 Die Laplace-Transformierte elementarer Zeitfunktionen	27
3.5 Die Eigenschaften der Laplace-Transformation — Laplace-Transformation einfacher mathematischer Operationen	30

XVIII Inhaltsverzeichnis

3.5.1	Überlagerung	30
3.5.2	Integration	30
3.5.3	Differentiation	31
3.5.4	Produkt zweier Laplace-Funktionen — Faltung	31
3.5.5	Multiplikationssatz	33
3.5.6	Verschiebung im Zeitbereich (Oberbereich)	33
3.5.7	Verschiebung im Laplace-Bereich (Unterbereich)	34
3.5.8	Dehnung bzw. Stauchung	34
3.5.9	Anfangswert-Theorem	34
3.5.10	Endwert-Theorem	35
3.5.11	Tabelle mathematischer Operationen	35
3.6	Analyse eines RC-Netzwerkes mittels Laplace-Transformation	36
3.7	Die Rücktransformation von Laplace-Transformierten in den Zeitbereich	37
3.8	Lösung von linearen Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten	39
3.9	Berechnung von Einschwingvorgängen in elektrischen Netzwerken mit konzentrierten linearen passiven Bauelementen	41
3.10	Rücktransformation mittels Residuenmethode - Heavisidescher Entwicklungssatz	52
3.11	Vierpol-Übertragungsfunktion im Zeit- und Frequenzbereich	56
3.12	Beschreibung von linearen zeitinvarianten Netzwerken durch ihre Sprungantwort	60
3.13	Bode-Diagramme	60
3.13.1	Regeln für Bode-Diagramme (reelle Pole und Nullstellen)	65
3.13.2	Regeln für Bode-Diagramme mit komplexen Polpaaren	67
4	Nichtlineare elektrische Bauelemente, Schaltungen und Systeme	73
4.1	Nichtlineare konzentrierte Bauelemente (R, L, C)	73
4.1.1	Vorbemerkungen	73
4.1.2	Nichtlinearer Widerstand	74
4.1.3	Nichtlineare Induktivität	79
*	4.1.4 Nichtlineare Kapazität	85
4.2	Gesteuerte Quellen	89
4.3	Analyse nichtlinearer elektrischer Netzwerke	90
5	Meßfehler	95
5.1	Systematische Meßfehler	96
5.2	Zufällige Meßfehler	98
5.2.1	Nörmalverteilung, Mittelwert, Standardabweichung	98
5.2.2	Vertrauensbereich für den Schätzwert	101
5.2.3	Fortpflanzung zufälliger Fehler	105
5.3	Genauigkeitsklassen bei Meßgeräten	106

5.4	Dynamische Meßfehler	106
5.4.1	Das Übertragungsverhalten von Meßsystemen	107
5.4.2	Definition des dynamischen Meßfehlers	111
5.4.3	Bestimmung des dynamischen Meßfehlers-.	112
5.4.4	Meßsystem mit Tiefpaßverhalten	113
6	Analoges Messen elektrischer Größen	117
6.1	Elektromechanische Meßgeräte	117
6.1.1	Drehspulmeßwerk	118
6.1.2	Galvanometer	123
6.1.3	Elektrodynamisches Meßwerk	126
6.1.4	Dreheisen meßwerk	129
6.1.5	Drehspulquotientenmeßwerk (Kreuzspulmeßwerk)	130
6.1.6	Drehmagnetmeßwerk	132
6.1.7	Elektrostatisches Meßwerk	133
6.1.8	Schaltzeichen für Meßgeräte	135
6.2	Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	136
6.2.1	Messung von Gleichströmen	136
6.2.2	Messung von Gleichspannungen	139
6.2.3	Gleichzeitiges Messen von Strom und Spannung	142
6.3	Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	143
6.3.1	Begriffsdefinitionen	143
6.3.2	Gleichrichtung	144
6.3.3	Messung des Scheitelwertes (Spitzenwert, Peak Value)	146
6.3.4	Messung des Gleichrichtwertes	149
6.3.5	Messung des Effektivwertes	150
6.3.6	Meßwandler	151
6.3.7	Strommeßzange für Wechselstrom	158
6.3.8	Hallelement (Galvanomagnetischer Effekt)	164
6.3.9	Strommeßzange für Gleichstrom	168
7	Meßverstärker	171
7.1	Operationsverstärker	172
7.1.1	Idealer Operationsverstärker	172
^ 7.1.2	Realer Operationsverstärker	173
7.1.3	Definitionen von Operationsverstärker-Kenngrößen	176
7.1.4	Operationsverstärker-Grundsaltungen	183
7.1.5	Operationsverstärker mit differentielltem Ausgang	196
7.2	Spezielle Meßverstärker	200
7.2.1	Differenzverstärker	200
7.2.2	Instrumentenverstärker (Instrumentierungsverstärker)	201
7.2.3	Zerhacker-Verstärker	203
7.2.4	Ladungsverstärker	204
7.3	Rauschen von Meßverstärkern	205

8	Messung der elektrischen Leistung	219
8.1	Leistungsmessung im Gleichstromkreis	219
8.2	Leistungsmessung im Wechselstromkreis	221
8.2.1	Begriffsdefinitionen	221
8.2.2	Leistungsmessung im Einphasennetz	221
8.2.3	Leistungsmessung in Drehstromsystemen	223
8.3	Messung der elektrischen Arbeit	231
9	Messung von elektrischen Impedanzen	235
9.1	Messung von ohmschen Widerständen	235
9.1.1	Strom- und Spannungsmessung	235
9.1.2	Vergleich mit einem Referenzwiderstand	236
9.1.3	Verwendung einer Konstantstromquelle	238
9.1.4	Verwendung eines Kreuzspulinstrumentes	239
9.2	Kompensationsschaltungen	240
9.2.1	Gleichspannungskompensation	240
9.2.2	Gleichstromkompensation	241
9.3	Gleichstrom-Meßbrücken	242
9.3.1	Gleichstrom-Ausschlagbrücken	243
9.3.2	Gleichstrom-Abgleichbrücken	245
9.4	Messung von Schein- und Blindwiderständen	245
9.5	Wechselstrom-Meßbrücken	249
9.5.1	Wechselstrom-Abgleichbrücken	249
9.5.2	Einflüsse von Eid- und Streukapazitäten	252
9.5.3	Halbautomatischer Brückenabgleich	253
9.5.4	Wechselstrom- Ausschlagbrücken	257
10	Darstellung des Zeitverlaufes elektrischer Signale	263
10.1	Analoges Elektronenstrahl-Oszilloskop	263
10.1.1	Auftau und Funktion der Elektronenstrahl-Röhre	263
10.1.2	Zeitablenkung und Triggerung	267
10.1.3	Funktionsgruppen eines Analog-Oszilloskops	270
10.1.4	Sampling-Oszilloskop	273
10.2	Spannungsteiler in Elektronenstrahl-Oszilloskopen	276
10.3	Fehler bei der analogen Elektronenstrahl-Oszilloskopie	278
10.3.1	Statische Fehler (Fehler der Ablenkkoeffizienten)	278
10.3.2	Linearitätsfehler	279
10.3.3	Dynamische Fehler des Oszilloskops	280
10.4	Digital-Speicheroszilloskop	287
10.4.1	Prinzipielle Funktionsweise	287
10.4.2	Wiedergabe des aufgezeichneten Bildes	289
10.4.3	Betriebsarten des Digital-Speicheroszilloskops	291
10.4.4	Einsatz von Digital-Oszilloskopen in Verbindung mit Computern	292
10.5	Vergleich Analog- und Digital-Oszilloskope	292

10.6	Digital-Phosphor-Oszilloskop	293
10.7	Stand der Technik bei Digital-Oszilloskopen	294
11	Digitale Meßtechnik	297
11.1	Duales Zahlensystem und Binärcodes	297
11.1.1	Dualzahlendarstellung	297
11.1.2	BCD-, Hexadezimal- und Gray-Code	298
11.1.3	Fehlererkennung und Fehlerkorrektur	299
11.2	Binäre Signale und ihre Verknüpfung	299
11.2.1	Grundregeln bei der logischen Verknüpfung	299
11.2.2	Digitale Grundschaltungen (Gatterschaltungen)	300
11.2.3	Digitale Addierer	304
11.3	Bistabile Kippschaltungen	305
11.3.1	RS-Flip-Flop	306
11.3.2	Taktzustandgesteuertes RS-Flip-Flop	307
11.3.3	Taktflankengesteuertes RS-Flip-Flop	308
11.3.4	Taktzustandgesteuertes D-Flip-Flop (Data-Latch)	308
11.3.5	Taktflankengesteuertes D-Flip-Flop	310
11.3.6	Taktflankengesteuertes JK-Flip-Flop	311
11.3.7	Taktflankengesteuertes T-Flip-Flop	312
11.4	Monostabile Kippstufe	313
11.5	Zähler-Schaltungen	314
11.5.1	Dualzähler	315
11.5.2	BCD-Zähler	317
11.6	Digital-Analog-Umsetzung	318
11.6.1	Grundlagen und Kenngrößen	318
11.6.2	Schaltungstechnische Realisierungen	320
11.6.3	Fehler bei der Digital-Analog-Umsetzung	325
11.7	Analog-Digital-Umsetzung	328
11.7.1	Abtastung (Sainpling)	329
11.7.2	Abtast-Halte-Schaltungen	332
11.7.3	Direktvergleichende Analog-Digital-Umsetzer	334
11.7.4	Analog-Digital-Umsetzung mit Delta-Sigma-Modulator	342
11.7.5	Time-Division-Multiplizierer (Impulsbreiten-Multiplizierer, Sägezahn-Multiplizierer)	350
11.7.6	Analog-Digital-Umsetzung mit Zeit oder Frequenz	352
11.7.7	Vergleich der Grundprinzipien	360
11.7.8	Fehler bei der Analog-Digital-Umsetzung	361
11.8	Digital-Multimeter (DMM)	365
11.8.1	Anzahl der Stellen und Genauigkeit	365
11.8.2	Beispiel eines 4 1/2-stelligen Digital-Multimeters	366
11.8.3	Messungen des echten Effektivwertes von Signalen mit Gleichanteil	368
11.8.4	Gesamtfehler infolge Scheitelfaktor	368

11.9	Strom-/Spannungsquellen mit Rückmeßfunktion (Source Measure Units)	369
11.9.1	Source Measure Units in automatischen Testsystemen	369
11.9.2	Messung kleiner Ströme bzw. Spannungen mit SMUs	371
12	Die Messung von Frequenz und Zeit	373
12.1	Mechanische Frequenzmessung	374
12.2	Digitale Frequenzmessung	375
12.3	Digitale Zeitmessung	376
12.3.1	Zeitintervallmessung (Zeitdifferenzmessung)	376
12.3.2	Periodendauermessung	380
12.4	Digitale Phasenwinkelmessung	381
12.5	Rechnender Zähler	382
12.6	Zeit-Spannungs-Umsetzer (t/U-Umsetzer)	383
12.7	Frequenz-Spannungs-Umsetzer (f/U-Umsetzer)	383
12.8	Oszillatoren	384
12.8.1	Grundlagen	384
12.8.2	Harmonische Oszillatoren	386
12.8.3	LC-Oszillator	387
12.8.4	Relaxationsoszillatoren	389
12.8.5	Quarzoszillator	392
12.8.6	Operationsverstärker-Schaltung eines Quarzoszillators	395
12.8.7	Fehler von Schwingquarzen	396
12.9	Fehler bei der digitalen Zeitintervall- bzw. Frequenzmessung	398
12.10	Atomuhren, Zeitzeichensender und Funknavigation	401
12.10.1	Atomuhren	401
12.10.2	DCF-77 Zeitzeichensender	403
12.10.3	NAVSTAR/GPS-Satellitenavigation	404
12.10.4	Galileo-Satellitenavigation	408
12.10.5	Störfaktoren bei der Satellitenavigation	411
13	Meßsignalverarbeitung	413
13.1	Aufgaben und Bedeutung	413
13.2	Signalarten und Analyseformen	415
13.3	Multiplizieren, Dividieren, Quadrieren, Radizieren	416
13.4	Ermittlung des Effektivwertes	419
13.4.1	Messung des Effektivwertes für beliebige Signalverläufe	421
13.5	Bestimmung von Mittelungswerten	422
13.6	Kenngrößen nicht-sinusförmiger periodischer Signale	424
13.7	Messung von Signaleigenschaften mittels Korrelationsfunktion	427
13.8	Äußere Störeinflüsse	438
13.9	Optimaler (Wiener-Filter)	441
13.9.1	Übertragungsfunktion eines Optimalfilters	441
13.9.2	Beispiel für ein Optimalfilter	445

14	Regression, lineare Korrelation und Hypothesen-	
	Testverfahren	451
14.1	Regressionsverfahren	451
14.1.1	Ausgleichsgerade (lineare Regression)	452
14.1.2	Güte der Anpassung bei der linearen Regression (Varianz, Kovarianz, Restvarianz und Korrelationskoeffizient)	455
14.1.3	Ausgleichspolynome	459
14.1.4	Mehrfache lineare Regression	460
14.2	Lineare Korrelation	462
14.3	Testverfahren (Hypothesen-Testverfahren)	465
14.3.1	Testen von Hypothesen, Entscheidungen	465
14.3.2	Beispiele für Tests	469
15	Grundlagen der Rechnergestützten Meßdatenerfassung	475
15.1	Grundstrukturen von rechnergestützten Meßsystemen	475
15.2	Basis-Hardware zur Meßdatenerfassung	482
15.2.1	Multifunktions-Einsteckkarten	484
15.2.2	Multipler	487
15.2.3	Störungen infolge Erdschleifen und Einkopplungen	488
15.2.4	Serielle Schnittstellen	490
15.2.5	Parallelbussysteme	491
15.2.6	Datenlogger	491
15.3	Grundtypen des Datentransfers	491
16	Meßdatenerfassung im Labor	493
16.1	Die serielle RS232C-Schnittstelle (V.24-Schnittstelle)	495
16.1.1	Übertragungsmedien	495
16.1.2	Leistungsbelegung und Steckerverbindung der RS232C-Schnittstelle	496
16.1.3	Pegelfestlegung und deren logische Zuordnung	499
16.1.4	Logikdefinition für Datenleitungen	499
16.1.5	Logikdefinition für Steuer- und Meldeleitungen	500
16.1.6	Synchronisierung	500
* 16.1.7	Handshake-Verfahren (Quittierungsverfahren)	501
16.1.8	Software-Handshaking	501
16.1.9	Hardware-Handshaking	502
16.1.10	Hardware-Realisierung von seriellen Schnittstellen	503
16.2	Kenngrößen der seriellen Datenübertragung	506
16.3	Die RS485-Schnittstelle	507
16.3.1	Eine Twisted-Pair-Leitung	508
16.3.2	Zwei Twisted-Pair-Leitungen	508
16.4	Die 20 mA-Stromschleife	509
16.5	Die USB-Schnittstelle	509
16.6	Der IEC-BUS	510

16.6.1	Historie des IEC-Bus	511
16.6.2	Bezeichnungen des IEC-Bus	511
16.6.3	IEC-Bus-Komponenten	511
16.6.4	Gerätegrundfunktionen	512
16.6.5	IEC-Bus-Leitungen	513
16.6.6	Bus-Logik	514
16.6.7	Handshake-Verfahren (Dreidraht-Handshake)	515
16.6.8	Nachrichtenarten	517
16.6.9	Schlußzeichen	523
16.6.10	Statusabfrage	523
16.6.11	IEC-Bus-Hardware	524
16.7	VXI-Bus, PXI-Bus und MXI-Bus	527
16.7.1	VXI-Bus	527
16.7.2	Resource Manager (System Manager)	528
16.7.3	Commander	528
16.7.4	Servant	529
16.7.5	Busgliederung/Teilbusse	529
16.7.6	VXI- und IEC-Bus	529
16.7.7	PXI-Bus	530
16.7.8	PCI-Express	533
16.7.9	PXI-Express (PXIe)	533
16.7.10	MXI-Bus	534
16.7.11	PXI MultiComputing (PXImc)	536
16.7.12	Historie der bisher diskutierten Bus-Standards	537
17	Meßdatenerfassung im Feld	539
17.1	Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	539
17.1.1	Auftau einer SPS	539
17.1.2	Programmstruktur	539
17.1.3	Permanent-zyklischer Betrieb	540
17.1.4	Ausnahmen vom permanent-zyklischen Betrieb	542
17.1.5	Besonderheiten der Programmierung	542
17.1.6	Programmiersprachen für SPS nach IEC 61131-3	542
17.1.7	Beispiele für die IEC-genormten SPS- Programmiersprachen	544
17.2	Neue Entwicklungen bei Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS)	549
17.2.1	Vernetzung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen	549
17.2.2	Visualisierung von SPS-Daten und -Prozessen	553
17.3	Hierarchie industrieller Bussysteme	558
17.4	Vorschrift für eine einheitliche Kommunikation: Das ISO-Schichtenmodell	559
17.5	Netzwerktopologien	561
17.6	Bus-Zugriffsverfahren	562

17.6.1	Klassifizierung der Bus-Zugriffsverfahren	563
17.7	Modulationsverfahren und Bitcodierung	563
17.7.1	Alternierende Puls Modulation (APM)	563
17.7.2	Fehlererkennung und Datensicherung	565
17.7.3	Bitcodierung	566
17.8	Schnittstellenkonverter	567
17.9	Der Feldbus (FAN)	568
17.9.1	ASI-Bus	571
17.9.2	CAN	572
17.9.3	PROFIBUS-DP	574
17.9.4	FIP-Bus	577
17.9.5	INTERBUS-S	578
17.9.6	BITBUS	580
17.9.7	EIB (European Installation Bus)	581
17.9.8	LON (Local Operating Network)	583
17.9.9	DIN-Meßbus	585
17.10	Primäre Sensorelement-Schnittstelle (PrimSens)	586
18	Vernetzung von Meßdatenrechnern (Industrie-LAN, WAN)	589
18.1	IP-Adressen	590
18.2	Subnetzmasken	591
18.3	Internet-Protokoll (IP)	592
18.4	Transmission Control Protocol (TCP)	592
18.5	Echtzeitfähigkeit des Ethernet	592
18.6	Übergeordnete Kommunikationsebenen	593
18.7	Physikalische Ethernet-Übertragung	593
18.8	Ethernet-Telegrammstruktur	594
18.9	Verbindung mehrerer lokaler Netze	594
18.10	Standortübergreifende Vernetzung	596
18.10.1	Breitband-ISDN	596
18.10.2	Datex-P	597
18.10.3	GSM	597
18.10.4	Powerline-Kommunikation (Power Line Communication, PLC)	598
18.10.5	Satellitenkommunikation	599
18.10.6	Metropolitan Area Network (MAN)	600
18.10.7	Wide Area Network (WAN)	600
18.10.8	Hochgeschwindigkeits-Glasfasernetz FDD!	600
18.11	Rechnernetze zur Meßdatenübertragung	601
18.11.1	Spezielle Bussysteme zur Meßdatenerfassung	601
18.11.2	Vernetzung von Meßdatenerfassungssystemen mittels Ethernet	601
18.12	Virtuelle Instrumentierung auf der Basis von USB-Meßmodulen	605
18.12.1	Punktionsprinzip	605
18.12.2	Beispiele für USB-Meßgeräte	606

• 18.13 Ethernet-Nutzung zur .Meßdatenerfassung	610
18.13.1 LXI - Ein neuer Standard für die Meßtechnik	610
18.13.2 Die technische Basis von LXI	611
18.13.3 Die 3 Geräteklassen A, B und C des LXI-Standards. . .	612
18.13.4 Triggermöglichkeiten von LXI-Geräten	614
18.13.5 Triggerung gemäß IEEE-1588.	614
18.13.6 Die Situation des LXI-Gerätemarktes.	616
18.14 VPN - Virtual Private Network.	616
19 Programmierung von Meßdatenerfassungssystemen	619
19.1 Allgemeine Bemerkungen	619
19.2 IEC- und VXI-Bus-Kommunikation, SCPI-Standard	620
19.2.1 Syntax der SCPI-Sprache.	622
19.2.2 SCPI-Datenformate.	625
19.3 Einsatz kommerzieller Software.	626
19.4 Kategorien von Softwarelösungen	626
19.4.1 Dialoggeführte Komplettpakete (Fertiglösungen). . . .	626
19.4.2 Modul-Bibliotheken.	627
19.4.3 Graphikorientierte Entwicklungssysteme (Prograinngeneratoren).	627
19.4.4 Systeme mit speziellen Kommandosprachen	628
19.5 Lab VIEW.	629
19.6 Lab Windows.	634
19.7 MATLAB.	635
20 Gebäudeautomatisierung (Smart Home).	639
20.1 Struktur des Gesamtsystems.	640
20.2 Datenerfassung mit frequenzanaloger Schnittstelle	641
20.3 Datenerfassung mit digitaler Schnittstelle.	643
20.4 Datenerfassung mit energieautarker digitaler Funkschnittstelle	644
20.5 Lokale und weltweite Vernetzung	647
20.5.1 LAN - lokales Netzwerk.	647
20.5.2 Standortübergreifende Vernetzung	648
20.5.3 Weltweite Vernetzung.	649
*20.6 Software.	649
Literaturverzeichnis	653
Index	661