
Inhaltsverzeichnis

1	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
2	Die Grundlagen des Messens	11
2.1	Maßsysteme, Einheiten, Naturkonstanten	11
2.1.1	Maßsysteme	11
2.1.2	Naturkonstanten	13
2.1.3	Abgeleitete Einheiten	13
2.2	Größen- und Zahlenwertgleichungen	13
3	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

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)	34
3.5.7	Verschiebung im Laplace-Bereich (Unterbereich)	34
3.5.8	Dehnung bzw. Stauchung	35
3.5.9	Anfangswert-Theorem	35
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	42
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	61
3.13.1	Regeln für Bode-Diagramme (reelle Pole und Nullstellen)	65
3.13.2	Regeln für Bode-Diagramme mit komplexen Polpaaren	68
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	Normalverteilung, 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	Dreheisenmeßwerk	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 Erd- 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	Aufbau 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 Ablenkkoefizienten)	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 Grundsaltungen (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 (Sampling)	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
11.10	Elektronische Leistungsmesser	373
11.10.1	Leistungsmessung mit Hallelement	373
11.10.2	Integrierte Schaltkreise zur Leistungsmessung	374
11.10.3	Leistungsmessungs-IC für HF-Anwendungen	384
11.10.4	HF-Leistungsmessung mit kaskadiertem logarithmischem Verstärker	387
11.10.5	HF-Leistungsmessung mittels thermoelektrischem Wandler	388
11.10.6	Thermoelement (Seebeck-Effekt)	390
11.10.7	Bolometer	392
11.10.8	HF-Leistungsmessung mit Diodengleichrichter	393
12	Die Messung von Frequenz und Zeit	395
12.1	Mechanische Frequenzmessung	396
12.2	Digitale Frequenzmessung	397
12.3	Digitale Zeitmessung	398
12.3.1	Zeitintervallmessung (Zeitdifferenzmessung)	398
12.3.2	Periodendauermessung	402
12.4	Digitale Phasenwinkelmessung	403
12.5	Rechnender Zähler	404
12.6	Zeit-Spannungs-Umsetzer (t/U-Umsetzer)	405
12.7	Frequenz-Spannungs-Umsetzer (f/U-Umsetzer)	405
12.8	Oszillatoren	406
12.8.1	Grundlagen	406
12.8.2	Harmonische Oszillatoren	408
12.8.3	LC-Oszillator	409
12.8.4	Relaxationsozillatoren	411
12.8.5	Quarzoszillator	414
12.8.6	Operationsverstärker-Schaltung eines Quarzoszillators ..	417
12.8.7	Fehler von Schwingquarzen	418
12.9	Fehler bei der digitalen Zeitintervall- bzw. Frequenzmessung ..	420
12.10	Atomuhren, Zeitzeichensender und Funknavigation	423
12.10.1	Atomuhren	423
12.10.2	DCF-77 Zeitzeichensender	425
12.10.3	NAVSTAR/GPS-Satellitennavigation	426
12.10.4	Galileo-Satellitennavigation	430
12.10.5	Störfaktoren bei der Satellitennavigation	433

13 Meßsignalverarbeitung	435
13.1 Aufgaben und Bedeutung	435
13.2 Signalarten und Analyseformen	437
13.3 Multiplizieren, Dividieren, Quadrieren, Radizieren	438
13.4 Ermittlung des Effektivwertes	441
13.4.1 Messung des Effektivwertes für beliebige Signalverläufe	443
13.5 Bestimmung von Mittelungswerten	444
13.6 Kenngrößen nicht-sinusförmiger periodischer Signale	446
13.7 Messung von Signaleigenschaften mittels Korrelationsfunktion	449
13.8 Äußere Störeinflüsse	460
13.9 Optimalfilter (Wiener-Filter)	463
13.9.1 Übertragungsfunktion eines Optimalfilters	463
13.9.2 Beispiel für ein Optimalfilter	467
14 Regression, lineare Korrelation und Hypothesen-Testverfahren	473
14.1 Regressionsverfahren	473
14.1.1 Ausgleichsgerade (lineare Regression)	474
14.1.2 Güte der Anpassung bei der linearen Regression (Varianz, Kovarianz, Restvarianz und Korrelationskoeffizient)	477
14.1.3 Ausgleichspolynome	481
14.1.4 Mehrfache lineare Regression	482
14.2 Lineare Korrelation	484
14.3 Testverfahren (Hypothesen-Testverfahren)	487
14.3.1 Testen von Hypothesen, Entscheidungen	487
14.3.2 Beispiele für Tests	491
15 Grundlagen der Rechnergestützten Meßdatenerfassung	497
15.1 Grundstrukturen von rechnergestützten Meßsystemen	497
15.2 Basis-Hardware zur Meßdatenerfassung	504
15.2.1 Multifunktions-Einsteckkarten	506
15.2.2 Multiplexer	509
15.2.3 Störungen infolge Erdschleifen und Einkopplungen	510
15.2.4 Serielle Schnittstellen	512
15.2.5 Parallelbussysteme	513
15.2.6 Datenlogger	513
15.3 Grundtypen des Datentransfers	513
16 Meßdatenerfassung im Labor	515
16.1 Die serielle RS232C-Schnittstelle (V.24-Schnittstelle)	517
16.1.1 Übertragungsmedien	517
16.1.2 Leitungsbelegung und Steckerverbindung der RS232C-Schnittstelle	518
16.1.3 Pegelfestlegung und deren logische Zuordnung	521

16.1.4	Logikdefinition für Datenleitungen	521
16.1.5	Logikdefinition für Steuer- und Meldeleitungen	522
16.1.6	Synchronisierung	522
16.1.7	Handshake-Verfahren (Quittierungsverfahren)	523
16.1.8	Software-Handshaking	523
16.1.9	Hardware-Handshaking	524
16.1.10	Hardware-Realisierung von seriellen Schnittstellen	525
16.2	Kenngrößen der seriellen Datenübertragung	528
16.3	Die RS485-Schnittstelle	529
16.3.1	Eine Twisted-Pair-Leitung	530
16.3.2	Zwei Twisted-Pair-Leitungen	530
16.4	Die 20 mA-Stromschleife	531
16.5	Die USB-Schnittstelle	531
16.6	Der IEC-Bus	532
16.6.1	Historie des IEC-Bus	533
16.6.2	Bezeichnungen des IEC-Bus	533
16.6.3	IEC-Bus-Komponenten	533
16.6.4	Gerätegrundfunktionen	534
16.6.5	IEC-Bus-Leitungen	535
16.6.6	Bus-Logik	536
16.6.7	Handshake-Verfahren (Dreidraht-Handshake)	537
16.6.8	Nachrichtenarten	539
16.6.9	Schlußzeichen	545
16.6.10	Statusabfrage	545
16.6.11	IEC-Bus-Hardware	546
16.7	VXI-Bus, PXI-Bus und MXI-Bus	549
16.7.1	VXI-Bus	549
16.7.2	Resource Manager (System Manager)	550
16.7.3	Commander	550
16.7.4	Servant	551
16.7.5	Busgliederung/Teilbusse	551
16.7.6	VXI- und IEC-Bus	551
16.7.7	PXI-Bus	552
16.7.8	PCI-Express	555
16.7.9	PXI-Express (PXIe)	555
16.7.10	MXI-Bus	556
16.7.11	PXI MultiComputing (PXImc)	558
16.7.12	Historie der bisher diskutierten Bus-Standards	559
17	Meßdatenerfassung im Feld	561
17.1	Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	561
17.1.1	Aufbau einer SPS	561
17.1.2	Programmstruktur	561
17.1.3	Permanent-zyklischer Betrieb	562
17.1.4	Ausnahmen vom permanent-zyklischen Betrieb	564

17.1.5	Besonderheiten der Programmierung	564
17.1.6	Programmiersprachen für SPS nach IEC 61131-3	564
17.1.7	Beispiele für die IEC-genormten SPS- Programmiersprachen	566
17.2	Neue Entwicklungen bei Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS)	571
17.2.1	Vernetzung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen	571
17.2.2	Visualisierung von SPS-Daten und -Prozessen	575
17.3	Hierarchie industrieller Bussysteme	580
17.4	Vorschrift für eine einheitliche Kommunikation: Das ISO-Schichtenmodell	581
17.5	Netzwerktopologien	583
17.6	Bus-Zugriffsverfahren	584
17.6.1	Klassifizierung der Bus-Zugriffsverfahren	585
17.7	Modulationsverfahren und Bitcodierung	585
17.7.1	Alternierende Puls Modulation (APM)	585
17.7.2	Fehlererkennung und Datensicherung	587
17.7.3	Bitcodierung	588
17.8	Schnittstellenkonverter	589
17.9	Der Feldbus (FAN)	590
17.9.1	ASI-Bus	593
17.9.2	CAN	594
17.9.3	PROFIBUS-DP	596
17.9.4	FIP-Bus	599
17.9.5	INTERBUS-S	600
17.9.6	BITBUS	602
17.9.7	EIB (European Installation Bus)	603
17.9.8	LON (Local Operating Network)	605
17.9.9	DIN-Meßbus	607
17.10	Primäre Sensorelement-Schnittstelle (PrimSens)	608
18	Vernetzung von Meßdatenrechnern (Industrie-LAN, WAN)	611
18.1	IP-Adressen	612
18.2	Subnetzmasken	613
18.3	Internet-Protokoll (IP)	614
18.4	Transmission Control Protocol (TCP)	614
18.5	Echtzeitfähigkeit des Ethernet	614
18.6	Übergeordnete Kommunikationsebenen	615
18.7	Physikalische Ethernet-Übertragung	615
18.8	Ethernet-Telegrammstruktur	616
18.9	Verbindung mehrerer lokaler Netze	616
18.10	Standortübergreifende Vernetzung	618
18.10.1	Breitband-ISDN	618
18.10.2	Datex-P	619

18.10.3 GSM	619
18.10.4 Powerline-Kommunikation (Power Line Communication, PLC)	620
18.10.5 Satellitenkommunikation	621
18.10.6 Metropolitan Area Network (MAN)	622
18.10.7 Wide Area Network (WAN)	622
18.10.8 Hochgeschwindigkeits-Glasfasernetz FDDI	622
18.11 Rechnernetze zur Meßdatenübertragung	623
18.11.1 Spezielle Bussysteme zur Meßdatenerfassung	623
18.11.2 Vernetzung von Meßdatenerfassungssystemen mittels Ethernet	623
18.12 Virtuelle Instrumentierung auf der Basis von USB-Meßmodulen	627
18.12.1 Funktionsprinzip	627
18.12.2 Beispiele für USB-Meßgeräte	628
18.13 Ethernet-Nutzung zur Meßdatenerfassung	632
18.13.1 LXI - Ein neuer Standard für die Meßtechnik	632
18.13.2 Die technische Basis von LXI	633
18.13.3 Die 3 Geräteklassen A, B und C des LXI-Standards	634
18.13.4 Triggermöglichkeiten von LXI-Geräten	636
18.13.5 Triggerung gemäß IEEE-1588	636
18.13.6 Die Situation des LXI-Gerätemarktes	638
18.14 VPN - Virtual Private Network	638
19 Programmierung von Meßdatenerfassungssystemen	641
19.1 Allgemeine Bemerkungen	641
19.2 IEC- und VXI-Bus-Kommunikation, SCPI-Standard	642
19.2.1 Syntax der SCPI-Sprache	644
19.2.2 SCPI-Datenformate	647
19.3 Einsatz kommerzieller Software	648
19.4 Kategorien von Softwarelösungen	648
19.4.1 Dialoggeführte Komplettpakete (Fertiglösungen)	648
19.4.2 Modul-Bibliotheken	649
19.4.3 Graphikorientierte Entwicklungssysteme (Programmgeneratoren)	649
19.4.4 Systeme mit speziellen Kommandosprachen	650
19.5 LabVIEW	651
19.6 LabWindows	656
19.7 MATLAB	657
20 Gebäudeautomatisierung (Smart Home)	661
20.1 Struktur des Gesamtsystems	662
20.2 Datenerfassung mit frequenzanaloger Schnittstelle	663
20.3 Datenerfassung mit digitaler Schnittstelle	665
20.4 Datenerfassung mit energieautarker digitaler Funkschnittstelle	666
20.5 Lokale und weltweite Vernetzung	669

20.5.1 LAN - lokales Netzwerk	669
20.5.2 Standortübergreifende Vernetzung	670
20.5.3 Weltweite Vernetzung	671
20.6 Software	671
Literaturverzeichnis	675
Index	683