

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	Das SI	13
2.1.4	Das künftige SI	14
2.1.5	Abgeleitete Einheiten	18
2.2	Größen- und Zahlenwertgleichungen	18
3	Ausgleichsvorgänge, Frequenz-Transformation und Vierpol-Übertragungsverhalten	21
3.1	Fourier-Transformation	21
3.2	Ausgleichsvorgänge in linearen Netzwerken	25
3.3	Die Laplace-Transformation	28
3.4	Die Laplace-Transformierte elementarer Zeitfunktionen	31

3.5	Die Eigenschaften der Laplace-Transformation — Laplace-Transformation einfacher mathematischer Operationen	34
3.5.1	Überlagerung	34
3.5.2	Integration	34
3.5.3	Differentiation	35
3.5.4	Produkt zweier Laplace-Funktionen — Faltung	35
3.5.5	Multiplikationssatz	37
3.5.6	Verschiebung im Zeitbereich (Oberbereich)	38
3.5.7	Verschiebung im Laplace-Bereich (Unterbereich)	38
3.5.8	Dehnung bzw. Stauchung	39
3.5.9	Anfangswert-Theorem	39
3.5.10	Endwert-Theorem	39
3.5.11	Tabelle mathematischer Operationen	39
3.6	Analyse eines RC-Netzwerkes mittels Laplace-Transformation .	40
3.7	Die Rücktransformation von Laplace-Transformierten in den Zeitbereich	41
3.8	Lösung von linearen Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten	43
3.9	Berechnung von Einschwingvorgängen in elektrischen Netzwerken mit konzentrierten linearen passiven Bauelementen	46
3.10	Rücktransformation mittels Residuenmethode - Heavisidescher Entwicklungssatz	56
3.11	Vierpol-Übertragungsfunktion im Zeit- und Frequenzbereich . .	60
3.12	Beschreibung von linearen zeitinvarianten Netzwerken durch ihre Sprungantwort	64
3.13	Bode-Diagramme	65
3.13.1	Regeln für Bode-Diagramme (reelle Pole und Nullstellen)	69
3.13.2	Regeln für Bode-Diagramme mit komplexen Polpaaren	72
4	Nichtlineare elektrische Bauelemente, Schaltungen und Systeme	77
4.1	Nichtlineare konzentrierte Bauelemente (R, L, C)	77
4.1.1	Vorbemerkungen	77
4.1.2	Nichtlinearer Widerstand	78
4.1.3	Nichtlineare Induktivität	85
4.1.4	Nichtlineare Kapazität	92
4.2	Gesteuerte Quellen	95
4.3	Analyse nichtlinearer elektrischer Netzwerke	96
5	Messfehler	103
5.1	Systematische Messfehler	104
5.2	Zufällige Messfehler	106
5.2.1	Normalverteilung, Mittelwert, Standardabweichung . . .	106

5.2.2	Vertrauensbereich für den Schätzwert	109
5.2.3	Fortpflanzung zufälliger Fehler	113
5.3	Genauigkeitsklassen bei Messgeräten	114
5.4	Dynamische Messfehler	114
5.4.1	Das Übertragungsverhalten von Messsystemen	115
5.4.2	Definition des dynamischen Messfehlers	119
5.4.3	Bestimmung des dynamischen Messfehlers	120
5.4.4	Messsystem mit Tiefpassverhalten	121
6	Analoges Messen elektrischer Größen	125
6.1	Elektromechanische Messgeräte	125
6.1.1	Drehspulmesswerk	126
6.1.2	Galvanometer	131
6.1.3	Elektrodynamisches Messwerk	134
6.1.4	Dreheisenmesswerk	137
6.1.5	Drehpulquotientenmesswerk (Kreuzspulmesswerk)	138
6.1.6	Drehmagnetmesswerk	140
6.1.7	Elektrostatisches Messwerk	141
6.1.8	Schaltzeichen für Messgeräte	143
6.2	Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	144
6.2.1	Messung von Gleichströmen	144
6.2.2	Messung von Gleichspannungen	147
6.2.3	Gleichzeitiges Messen von Strom und Spannung	150
6.3	Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	151
6.3.1	Begriffsdefinitionen	151
6.3.2	Gleichrichtung	152
6.3.3	Messung des Scheitelwertes (Spitzenwert, Peak Value)	154
6.3.4	Messung des Gleichrichtwertes	157
6.3.5	Messung des Effektivwertes	158
6.3.6	Messwandler	159
6.3.7	Strommesszange für Wechselstrom	166
6.3.8	Hallelement (Galvanomagnetischer Effekt)	172
6.3.9	Strommesszange für Gleichstrom	176
7	Messverstärker	179
7.1	Operationsverstärker	180
7.1.1	Idealer Operationsverstärker	180
7.1.2	Realer Operationsverstärker	181
7.1.3	Definitionen von Operationsverstärker-Kenngrößen	184
7.1.4	Operationsverstärker-Grundsaltungen	192
7.1.5	Operationsverstärker mit differentiellm Ausgang	204
7.2	Spezielle Messverstärker	209
7.2.1	Differenzverstärker	209
7.2.2	Instrumentenverstärker (Instrumentierungsverstärker)	211
7.2.3	Zerhacker-Verstärker	212

7.2.4	Ladungsverstärker	214
7.3	Rauschen von Messverstärkern	215
8	Messung der elektrischen Leistung	229
8.1	Leistungsmessung im Gleichstromkreis	229
8.2	Leistungsmessung im Wechselstromkreis	231
8.2.1	Begriffsdefinitionen	231
8.2.2	Leistungsmessung im Einphasennetz	231
8.2.3	Leistungsmessung in Drehstromsystemen	233
8.3	Messung der elektrischen Arbeit	241
9	Messung von elektrischen Impedanzen	245
9.1	Messung von ohmschen Widerständen	245
9.1.1	Strom- und Spannungsmessung	245
9.1.2	Vergleich mit einem Referenzwiderstand	246
9.1.3	Verwendung einer Konstantstromquelle	248
9.1.4	Verwendung eines Kreuzspulinstrumentes	249
9.2	Kompensationsschaltungen	250
9.2.1	Gleichspannungskompensation	250
9.2.2	Gleichstromkompensation	251
9.3	Gleichstrom-Messbrücken	252
9.3.1	Gleichstrom-Ausschlagbrücken	253
9.3.2	Gleichstrom-Abgleichbrücken	255
9.4	Messung von Schein- und Blindwiderständen	255
9.5	Wechselstrom-Messbrücken	259
9.5.1	Wechselstrom-Abgleichbrücken	259
9.5.2	Einflüsse von Erd- und Streukapazitäten	262
9.5.3	Halbautomatischer Brückenabgleich	263
9.5.4	Wechselstrom-Ausschlagbrücken	267
10	Darstellung des Zeitverlaufes elektrischer Signale	273
10.1	Analoges Elektronenstrahl-Oszilloskop	273
10.1.1	Aufbau und Funktion der Elektronenstrahl-Röhre ...	273
10.1.2	Zeitablenkung und Triggerung	277
10.1.3	Funktionsgruppen eines Analog-Oszilloskops	280
10.1.4	Sampling-Oszilloskop	283
10.2	Spannungsteiler in Elektronenstrahl-Oszilloskopen	286
10.3	Fehler bei der analogen Elektronenstrahl-Oszilloskopie	288
10.3.1	Statische Fehler (Fehler der Ablenkoeffizienten) ...	288
10.3.2	Linearitätsfehler	289
10.3.3	Dynamische Fehler des Oszilloskops	290
10.4	Digital-Speicheroszilloskop	297
10.4.1	Prinzipielle Funktionsweise	297
10.4.2	Wiedergabe des aufgezeichneten Bildes	299
10.4.3	Betriebsarten des Digital-Speicheroszilloskops	301

10.4.4	Einsatz von Digital-Oszilloskopen in Verbindung mit Computern	302
10.5	Vergleich Analog- und Digital-Oszilloskope	302
10.6	Digital-Phosphor-Oszilloskop	303
10.7	Analoger und digitaler Trigger	304
10.8	Mixed-Signal-Oszilloskope	306
10.9	Stand der Technik bei Digital-Oszilloskopen	308
11	Digitale Messtechnik	311
11.1	Duales Zahlensystem und Binärcodes	311
11.1.1	Dualzahlendarstellung	311
11.1.2	BCD-, Hexadezimal- und Gray-Code	312
11.1.3	Fehlererkennung und Fehlerkorrektur	313
11.2	Binäre Signale und ihre Verknüpfung	313
11.2.1	Grundregeln bei der logischen Verknüpfung	313
11.2.2	Digitale Grundschaltungen (Gatterschaltungen)	314
11.2.3	Digitale Addierer	318
11.3	Bistabile Kippschaltungen	319
11.3.1	RS-Flip-Flop	320
11.3.2	Taktzustandgesteuertes RS-Flip-Flop	321
11.3.3	Taktflankengesteuertes RS-Flip-Flop	322
11.3.4	Taktzustandgesteuertes D-Flip-Flop (Data-Latch)	322
11.3.5	Taktflankengesteuertes D-Flip-Flop	324
11.3.6	Taktflankengesteuertes JK-Flip-Flop	325
11.3.7	Taktflankengesteuertes T-Flip-Flop	326
11.4	Monostabile Kippstufe	327
11.5	Zähler-Schaltungen	328
11.5.1	Dualzähler	329
11.5.2	BCD-Zähler	331
11.6	Digital-Analog-Umsetzung	332
11.6.1	Grundlagen und Kenngrößen	332
11.6.2	Schaltungstechnische Realisierungen	334
11.6.3	Fehler bei der Digital-Analog-Umsetzung	339
11.7	Analog-Digital-Umsetzung	342
11.7.1	Abtastung (Sampling)	343
11.7.2	Abtast-Halte-Schaltungen	346
11.7.3	Direktvergleichende Analog-Digital-Umsetzer	348
11.7.4	Analog-Digital-Umsetzung mit Delta-Sigma-Modulator	356
11.7.5	Time-Division-Multiplizierer (Impulsbreiten-Multiplizierer, Sägezahn-Multiplizierer)	364
11.7.6	Analog-Digital-Umsetzung mit Zeit oder Frequenz	366
11.7.7	Vergleich der Grundprinzipien	374
11.7.8	Fehler bei der Analog-Digital-Umsetzung	375
11.8	Digital-Multimeter (DMM)	379
11.8.1	Anzahl der Stellen und Genauigkeit	379

11.8.2	Beispiel eines 4 1/2-stelligen Digital-Multimeters	380
11.8.3	Messungen des echten Effektivwertes von Signalen mit Gleichanteil	382
11.8.4	Gesamtfehler infolge Scheitelfaktor	382
11.9	Strom-/Spannungsquellen mit Rückmessfunktion (Source Measure Units)	383
11.9.1	Source Measure Units in automatischen Testsystemen .	383
11.9.2	Messung kleiner Ströme bzw. Spannungen mit SMUs .	385
11.10	Elektronische Leistungsmesser	387
11.10.1	Leistungsmessung mit Hallelement	387
11.10.2	Integrierte Schaltkreise zur Leistungsmessung	388
11.10.3	Smart Meter für die Messung des Verbrauchs an elektrischer Energie	398
11.10.4	Leistungsmessungs-IC für HF-Anwendungen	398
11.10.5	HF-Leistungsmessung mit kaskadiertem logarithmischem Verstärker	402
11.10.6	HF-Leistungsmessung mittels thermoelektrischem Wandler	403
11.10.7	Thermoelement (Seebeck-Effekt)	405
11.10.8	Bolometer	407
11.10.9	HF-Leistungsmessung mit Diodengleichrichter	408
12	Die Messung von Frequenz und Zeit	411
12.1	Mechanische Frequenzmessung	412
12.2	Digitale Frequenzmessung	413
12.3	Digitale Zeitmessung	414
12.3.1	Zeitintervallmessung (Zeitdifferenzmessung)	414
12.3.2	Periodendauermessung	418
12.4	Digitale Phasenwinkelmessung	419
12.5	Rechnender Zähler	420
12.6	Zeit-Spannungs-Umsetzer (t/U-Umsetzer)	421
12.7	Frequenz-Spannungs-Umsetzer (f/U-Umsetzer)	421
12.8	Oszillatoren	422
12.8.1	Grundlagen	422
12.8.2	Harmonische Oszillatoren	424
12.8.3	LC-Oszillator	425
12.8.4	Relaxationsoszillatoren	427
12.8.5	Quarzoszillator	430
12.8.6	Operationsverstärker-Schaltung eines Quarzoszillators .	433
12.8.7	Fehler von Schwingquarzen	434
12.9	Fehler bei der digitalen Zeitintervall- bzw. Frequenzmessung .	436
12.10	Atomuhren, Zeitzeichensender und Funknavigation	439
12.10.1	Atomuhren	439
12.10.2	DCF-77 Zeitzeichensender	441
12.10.3	NAVSTAR/GPS-Satellitennavigation	442

12.10.4	Galileo-Satellitennavigation	446
12.10.5	Störfaktoren bei der Satellitennavigation	449
13	Messsignalverarbeitung	451
13.1	Aufgaben und Bedeutung	451
13.2	Signalarten und Analyseformen	453
13.3	Multiplizieren, Dividieren, Quadrieren, Radizieren	454
13.4	Ermittlung des Effektivwertes	457
13.4.1	Messung des Effektivwertes für beliebige Signalverläufe	459
13.5	Bestimmung von Mittelungswerten	460
13.6	Kenngößen nicht-sinusförmiger periodischer Signale	462
13.7	Messung von Signaleigenschaften mittels Korrelationsfunktion	465
13.8	Äußere Störeinträge	476
13.9	Optimalfilter (Wiener-Filter)	479
13.9.1	Übertragungsfunktion eines Optimalfilters	479
13.9.2	Beispiel für ein Optimalfilter	483
14	Regression, lineare Korrelation und Hypothesen-Testverfahren	491
14.1	Regressionsverfahren	491
14.1.1	Ausgleichsgerade (lineare Regression)	492
14.1.2	Güte der Anpassung bei der linearen Regression (Varianz, Kovarianz, Restvarianz und Korrelationskoeffizient)	495
14.1.3	Ausgleichspolynome	499
14.1.4	Mehrfache lineare Regression	500
14.2	Lineare Korrelation	502
14.3	Testverfahren (Hypothesen-Testverfahren)	505
14.3.1	Testen von Hypothesen, Entscheidungen	505
14.3.2	Beispiele für Tests	509
15	Grundlagen der Rechnergestützten Messdatenerfassung	515
15.1	Grundstrukturen von rechnergestützten Messsystemen	515
15.2	Basis-Hardware zur Messdatenerfassung	522
15.2.1	Multifunktions-Einsteckkarten	524
15.2.2	Multipllexer	527
15.2.3	Störungen infolge Erdschleifen und Einkopplungen	529
15.2.4	Serielle Schnittstellen	531
15.2.5	Parallelbussysteme	531
15.2.6	Datenlogger	531
15.3	Grundtypen des Datentransfers	532

16 Messdatenerfassung im Labor	533
16.1 Die serielle RS232C-Schnittstelle (V.24-Schnittstelle)	535
16.1.1 Übertragungsmedien	535
16.1.2 Leitungsbelegung und Steckerverbindung der RS232C-Schnittstelle	536
16.1.3 Pegelfestlegung und deren logische Zuordnung	539
16.1.4 Logikdefinition für Datenleitungen	539
16.1.5 Logikdefinition für Steuer- und Meldeleitungen	540
16.1.6 Synchronisierung	540
16.1.7 Handshake-Verfahren (Quittierungsverfahren)	541
16.1.8 Software-Handshaking	541
16.1.9 Hardware-Handshaking	542
16.1.10 Hardware-Realisierung von seriellen Schnittstellen	543
16.2 Kenngrößen der seriellen Datenübertragung	546
16.3 Die RS485-Schnittstelle	547
16.3.1 Eine Twisted-Pair-Leitung	548
16.3.2 Zwei Twisted-Pair-Leitungen	548
16.4 Die 20 mA-Stromschleife	549
16.5 Inter Integrated Circuit (I ² C)	549
16.6 Die USB-Schnittstelle	551
16.7 Der IEC-Bus	555
16.7.1 Historie des IEC-Bus	555
16.7.2 Bezeichnungen des IEC-Bus	555
16.7.3 IEC-Bus-Komponenten	556
16.7.4 Gerätegrundfunktionen	557
16.7.5 IEC-Bus-Leitungen	557
16.7.6 Bus-Logik	559
16.7.7 Handshake-Verfahren (Dreidraht-Handshake)	560
16.7.8 Nachrichtenarten	562
16.7.9 Schlusszeichen	567
16.7.10 Statusabfrage	567
16.7.11 IEC-Bus-Hardware	568
16.8 VXI-Bus, PXI-Bus und MXI-Bus	570
16.8.1 VXI-Bus	571
16.8.2 Resource Manager (System Manager)	573
16.8.3 Commander	573
16.8.4 Servant	573
16.8.5 Busgliederung/Teilbusse	573
16.8.6 VXI- und IEC-Bus	574
16.8.7 PXI-Bus	574
16.8.8 PCI-Express	577
16.8.9 PXI-Express (PXIe)	578
16.8.10 MXI-Bus	578
16.8.11 PXI MultiComputing (PXImc)	580
16.8.12 Historie der bisher diskutierten Bus-Standards	581

17	Messdatenerfassung im Feld	583
17.1	Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	583
17.1.1	Aufbau einer SPS	583
17.1.2	Programmstruktur	583
17.1.3	Permanent-zyklischer Betrieb	584
17.1.4	Ausnahmen vom permanent-zyklischen Betrieb	586
17.1.5	Besonderheiten der Programmierung	586
17.1.6	Programmiersprachen für SPS nach IEC 61131-3	586
17.1.7	Beispiele für die IEC-genormten SPS- Programmiersprachen	588
17.2	Neue Entwicklungen bei Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS)	593
17.2.1	Vernetzung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen	593
17.2.2	Visualisierung von SPS-Daten und -Prozessen	597
17.2.3	Linux-basierte Speicherprogrammierbare Steuerungen	602
17.2.4	SPS-Spezialklemmen	603
17.2.5	EnOcean-Funkempfänger-Busklemmen	605
17.3	Einplatinen-Computer	606
17.3.1	Einplatinen-Computer in der Mess- und Automatisierungstechnik	607
17.4	Hierarchie industrieller Bussysteme	611
17.5	Vorschrift für eine einheitliche Kommunikation: Das ISO-Schichtenmodell	612
17.6	Netzwerktopologien	614
17.7	Bus-Zugriffsverfahren	615
17.7.1	Klassifizierung der Bus-Zugriffsverfahren	616
17.8	Modulationsverfahren und Bitcodierung	616
17.8.1	Alternierende Puls Modulation (APM)	616
17.8.2	Fehlererkennung und Datensicherung	618
17.8.3	Bitcodierung	619
17.9	Schnittstellenkonverter	620
17.10	Der Feldbus (FAN)	621
17.10.1	ASI-Bus	624
17.10.2	CAN	625
17.10.3	Flex Ray	628
17.10.4	PROFIBUS-DP	630
17.10.5	FIP-Bus	633
17.10.6	INTERBUS-S	634
17.10.7	BITBUS	636
17.10.8	KNX	637
17.10.9	LON (Local Operating Network)	641
17.10.10	DIN-Messbus	642

18	Vernetzung von Messdatenrechnern (Industrie-LAN, WAN)	645
18.1	IP-Adressen	646
18.2	Subnetzmasken	647
18.3	Internet-Protokoll (IP)	648
18.4	Transmission Control Protocol (TCP)	648
18.5	Echtzeitfähigkeit des Ethernet	648
18.6	Übergeordnete Kommunikationsebenen	649
18.7	Physikalische Ethernet-Übertragung	649
18.8	Ethernet-Telegrammstruktur	650
18.9	Verbindung mehrerer lokaler Netze	650
18.10	Standortübergreifende Vernetzung	652
18.10.1	Breitband-ISDN	652
18.10.2	Datex-P	653
18.10.3	GSM	653
18.10.4	Powerline-Kommunikation (Power Line Communication, PLC)	654
18.10.5	Satellitenkommunikation	655
18.10.6	Metropolitan Area Network (MAN)	656
18.10.7	Wide Area Network (WAN)	656
18.10.8	Hochgeschwindigkeits-Glasfasernetz FDDI	657
18.11	Rechnernetze zur Messdatenübertragung	657
18.11.1	Spezielle Bussysteme zur Messdatenerfassung	658
18.11.2	Vernetzung von Messdatenerfassungssystemen mittels Ethernet	658
18.12	Virtuelle Instrumentierung auf der Basis von USB- Messmodulen	660
18.12.1	Funktionsprinzip	660
18.12.2	Beispiele für USB-Messgeräte	663
18.13	Ethernet-Nutzung zur Messdatenerfassung	666
18.13.1	LXI - Ein neuer Standard für die Messtechnik	666
18.13.2	Die technische Basis von LXI	667
18.13.3	Die 3 Geräteklassen A, B und C des LXI-Standards	669
18.13.4	Triggermöglichkeiten von LXI-Geräten	669
18.13.5	Triggerung gemäß IEEE-1588	671
18.13.6	Die aktuelle Situation des LXI-Standards	672
18.14	EtherCAT	674
18.15	VPN - Virtual Private Network	677
19	Programmierung von Messdatenerfassungssystemen	681
19.1	Allgemeine Bemerkungen	681
19.2	IEC- und VXI-Bus-Kommunikation, SCPI-Standard	682
19.2.1	Syntax der SCPI-Sprache	684
19.2.2	SCPI-Datenformate	687
19.3	Einsatz kommerzieller Software	688
19.4	Kategorien von Softwarelösungen	688

19.4.1	Dialoggeführte Komplettpakete (Fertiglösungen)	688
19.4.2	Modul-Bibliotheken	689
19.4.3	Graphikorientierte Entwicklungssysteme (Programmgeneratoren)	689
19.4.4	Systeme mit speziellen Kommandosprachen	690
19.5	LabVIEW	691
19.6	LabWindows	695
19.7	MATLAB	696
20	Gebäudeautomatisierung (Smart Home)	701
20.1	Struktur des Gesamtsystems	702
20.2	Datenerfassung mit frequenzanaloger Schnittstelle	703
20.3	Datenerfassung mit digitaler Schnittstelle	705
20.4	Datenerfassung mit energieautarker digitaler Funkschnittstelle	706
20.5	Lokale und weltweite Vernetzung	709
20.5.1	LAN - lokales Netzwerk	709
20.5.2	Standortübergreifende Vernetzung	710
20.5.3	Weltweite Vernetzung	711
20.6	Software	711
	Literaturverzeichnis	715
	Index	723