
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	6
1.5.1	Ausschlagmethode - Kompensationsmethode	6
1.5.2	Analog - Digital	7
1.5.3	Kontinuierlich - Diskontinuierlich	9
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	12
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)	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	Bode-Diagramme für komplexe Polpaare	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	86
4.2	Gesteuerte Quellen	89
4.3	Analyse nichtlinearer elektrischer Netzwerke	91
5	Meßfehler	97
5.1	Systematische Meßfehler	98
5.2	Zufällige Meßfehler	100
5.2.1	Normalverteilung, Mittelwert, Standardabweichung ...	100
5.2.2	Vertrauensbereich für den Schätzwert	103
5.2.3	Fortpflanzung zufälliger Fehler	107
5.3	Genauigkeitsklassen bei Meßgeräten	108
5.4	Dynamische Meßfehler	108

5.4.1	Das Übertragungsverhalten von Meßsystemen	109
5.4.2	Definition des dynamischen Meßfehlers	113
5.4.3	Bestimmung des dynamischen Meßfehlers	114
5.4.4	Meßsystem mit Tiefpaßverhalten	115
6	Analoges Messen elektrischer Größen	119
6.1	Elektromechanische Meßgeräte	119
6.1.1	Drehspulmeßwerk	120
6.1.2	Galvanometer	125
6.1.3	Elektrodynamisches Meßwerk	128
6.1.4	Dreheisenmeßwerk	131
6.1.5	Drehspulquotientenmeßwerk (Kreuzspulmeßwerk)	132
6.1.6	Drehmagnetmeßwerk	134
6.1.7	Elektrostatistisches Meßwerk	135
6.1.8	Schaltzeichen für Meßgeräte	138
6.2	Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	138
6.2.1	Messung von Gleichströmen	138
6.2.2	Messung von Gleichspannungen	141
6.2.3	Gleichzeitiges Messen von Strom und Spannung	144
6.3	Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	145
6.3.1	Begriffsdefinitionen	145
6.3.2	Gleichrichtung	147
6.3.3	Messung des Scheitelwertes (Spitzenwert, Peak Value)	148
6.3.4	Messung des Gleichrichtwertes	150
6.3.5	Messung des Effektivwertes	151
6.3.6	Meßwandler	153
7	Meßverstärker	161
7.1	Operationsverstärker	162
7.1.1	Idealer Operationsverstärker	162
7.1.2	Realer Operationsverstärker	163
7.1.3	Definitionen von Operationsverstärker-Kenngrößen	166
7.1.4	Operationsverstärker-Grundsaltungen	173
7.2	Spezielle Meßverstärker	186
7.2.1	Differenzverstärker	186
7.2.2	Instrumentenverstärker (Instrumentierungsverstärker)	186
7.2.3	Zerhacker-Verstärker	188
7.2.4	Ladungsverstärker	189
7.3	Rauschen von Meßverstärkern	190
8	Messung der elektrischen Leistung	203
8.1	Leistungsmessung im Gleichstromkreis	203
8.2	Leistungsmessung im Wechselstromkreis	205
8.2.1	Begriffsdefinitionen	205
8.2.2	Leistungsmessung im Einphasennetz	205

8.2.3	Leistungsmessung in Drehstromsystemen	207
8.3	Messung der elektrischen Arbeit	215
9	Messung von elektrischen Impedanzen	219
9.1	Messung von ohmschen Widerständen	219
9.1.1	Strom- und Spannungsmessung	219
9.1.2	Vergleich mit einem Referenzwiderstand	220
9.1.3	Verwendung einer Konstantstromquelle	222
9.1.4	Verwendung eines Kreuzspulinstrumentes	223
9.2	Kompensationsschaltungen	224
9.2.1	Gleichspannungskompensation	224
9.2.2	Gleichstromkompensation	225
9.3	Gleichstrom-Meßbrücken	226
9.3.1	Gleichstrom-Ausschlagbrücken	226
9.3.2	Gleichstrom-Abgleichbrücken	229
9.4	Messung von Schein- und Blindwiderständen	229
9.5	Wechselstrom-Meßbrücken	233
9.5.1	Wechselstrom-Abgleichbrücken	233
9.5.2	Einflüsse von Erd- und Streukapazitäten	237
9.5.3	Halbautomatischer Brückenabgleich	238
9.5.4	Wechselstrom-Ausschlagbrücken	241
10	Darstellung des Zeitverlaufes elektrischer Signale	245
10.1	Analoges Elektronenstrahl-Oszilloskop	245
10.1.1	Aufbau und Funktion der Elektronenstrahl-Röhre ...	245
10.1.2	Zeitablenkung und Triggerung	249
10.1.3	Funktionsgruppen eines Analog-Oszilloskops	252
10.1.4	Sampling-Oszilloskop	255
10.2	Spannungsteiler in Elektronenstrahl-Oszilloskopen	258
10.3	Fehler bei der analogen Elektronenstrahl-Oszilloskopie	259
10.3.1	Statische Fehler (Fehler der Ablenkkoeffizienten) ...	259
10.3.2	Linearitätsfehler	261
10.3.3	Dynamische Fehler des Oszilloskops	262
10.4	Digital-Speicheroszilloskop	269
10.4.1	Prinzipielle Funktionsweise	269
10.4.2	Wiedergabe des aufgezeichneten Bildes	271
10.4.3	Betriebsarten des Digital-Speicheroszilloskops	273
10.4.4	Einsatz von Digital-Oszilloskopen in Verbindung mit Computern	274
10.5	Vergleich Analog- und Digital-Oszilloskope	274
10.6	Digital-Phosphor-Oszilloskop	274
10.7	Stand der Technik bei Digital-Oszilloskopen	276

11	Digitale Meßtechnik	279
11.1	Duales Zahlensystem und Binärcores	279
11.1.1	Dualzahlendarstellung	279
11.1.2	BCD-, Hexadezimal- und Gray-Code	280
11.1.3	Fehlererkennung und Fehlerkorrektur	280
11.2	Binäre Signale und ihre Verknüpfung	281
11.2.1	Grundregeln bei der logischen Verknüpfung	281
11.2.2	Digitale Grundsaltungen (Gatterschaltungen)	282
11.2.3	Digitale Addierer	286
11.3	Bistabile Kippschaltungen	287
11.3.1	RS-Flip-Flop	288
11.3.2	Taktzustandgesteuertes RS-Flip-Flop	289
11.3.3	Taktflankengesteuertes RS-Flip-Flop	289
11.3.4	Taktzustandgesteuertes D-Flip-Flop (Data-Latch)	290
11.3.5	Taktflankengesteuertes D-Flip-Flop	291
11.3.6	Taktflankengesteuertes JK-Flip-Flop	293
11.3.7	Taktflankengesteuertes T-Flip-Flop	294
11.4	Monostabile Kippstufe	295
11.5	Zähler-Schaltungen	297
11.5.1	Dualzähler	297
11.5.2	BCD-Zähler	299
11.6	Digital-Analog-Umsetzung	301
11.6.1	Grundlagen und Kenngrößen	301
11.6.2	Schaltungstechnische Realisierungen	303
11.6.3	Fehler bei der Digital-Analog-Umsetzung	308
11.7	Analog-Digital-Umsetzung	310
11.7.1	Abtastung (Sampling)	311
11.7.2	Abtast-Halte-Schaltungen	314
11.7.3	Direktvergleichende Analog-Digital-Umsetzer	316
11.7.4	Analog-Digital-Umsetzung mit Delta-Sigma-Modulator	322
11.7.5	Time-Division-Multiplizierer (Impulsbreiten-Multiplizierer, Sägezahn-Multiplizierer)	331
11.7.6	Analog-Digital-Umsetzung mit Zeit oder Frequenz	333
11.7.7	Vergleich der Grundprinzipien	340
11.7.8	Fehler bei der Analog-Digital-Umsetzung	341
11.8	Digital-Multimeter (DMM)	346
11.8.1	Anzahl der Stellen und Genauigkeit	346
11.8.2	Beispiel eines $4\frac{1}{2}$ -stelligen Digital-Multimeters	347
11.8.3	Messungen des echten Effektivwertes von Signalen mit Gleichanteil	348
11.8.4	Totaler Fehler infolge Scheitelfaktor	349
11.9	Strom-/Spannungsquellen mit Rückmeßfunktion (Source Measure Units)	350
11.9.1	Source Measure Units in automatischen Testsystemen	350
11.9.2	Messung kleiner Ströme bzw. Spannungen mit SMUs	352

12 Die Messung von Frequenz und Zeit	355
12.1 Mechanische Frequenzmessung	356
12.2 Digitale Frequenzmessung	357
12.3 Digitale Zeitmessung	358
12.3.1 Zeitintervallmessung (Zeitdifferenzmessung)	358
12.3.2 Periodendauermessung	362
12.4 Digitale Phasenwinkelmessung	363
12.5 Rechnender Zähler	363
12.6 Zeit-Spannungs-Umsetzer (t/U-Umsetzer)	364
12.7 Frequenz-Spannungs-Umsetzer (f/U-Umsetzer)	365
12.8 Oszillatoren	367
12.8.1 Grundlagen	367
12.8.2 Harmonische Oszillatoren	368
12.8.3 LC-Oszillator	369
12.8.4 Relaxationsoszillatoren	371
12.8.5 Quarzoszillator	373
12.8.6 Operationsverstärker-Schaltung eines Quarzoszillators	378
12.8.7 Fehler von Schwingquarzen	378
12.9 Fehler bei der digitalen Zeitintervall- bzw. Frequenzmessung ..	380
12.10 Atomuhren, Zeitzeichensender und Funknavigation	384
12.10.1 Atomuhren	384
12.10.2 DCF-77 Zeitzeichensender	385
12.10.3 NAVSTAR/GPS-Satellitennavigation	386
12.10.4 Galileo-Satellitennavigation	390
12.10.5 Störfaktoren bei der Satellitennavigation	392
13 Meßsignalverarbeitung	395
13.1 Aufgaben und Bedeutung	395
13.2 Signalarten und Analyseformen	397
13.3 Multiplizieren, Dividieren, Quadrieren, Radizieren	398
13.4 Ermittlung des Effektivwertes	401
13.5 Bestimmung von Mittelungswerten	403
13.6 Kenngrößen nicht-sinusförmiger periodischer Signale	405
13.7 Messung von Signaleigenschaften mittels Korrelationsfunktion ..	408
13.8 Äußere Störeinflüsse	419
13.9 Optimalfilter (Wiener-Filter)	423
13.9.1 Übertragungsfunktion eines Optimalfilters	423
13.9.2 Beispiel für ein Optimalfilter	427
14 Regression, lineare Korrelation und Hypothesen- Testverfahren	433
14.1 Regressionsverfahren	433
14.1.1 Ausgleichsgerade (lineare Regression)	434

14.1.2	Güte der Anpassung bei der linearen Regression (Varianz, Kovarianz, Restvarianz und Korrelationskoeffizient)	437
14.1.3	Ausgleichspolynome	441
14.1.4	Mehrfache lineare Regression	442
14.2	Lineare Korrelation	444
14.3	Testverfahren (Hypothesen-Testverfahren)	447
14.3.1	Testen von Hypothesen, Entscheidungen	447
14.3.2	Beispiele für Tests	451
15	Grundlagen der Rechnergestützten Meßdatenerfassung	457
15.1	Grundstrukturen von rechnergestützten Meßsystemen	457
15.2	Basis-Hardware zur Meßdatenerfassung	464
15.2.1	Multifunktions-Einsteckkarten	466
15.2.2	Multipllexer	469
15.2.3	Störungen infolge Erdschleifen und Einkopplungen	469
15.2.4	Serielle Schnittstellen	472
15.2.5	Parallelbussysteme	473
15.2.6	Datenlogger	473
15.3	Grundtypen des Datentransfers	473
16	Meßdatenerfassung im Labor	475
16.1	Die serielle RS232C-Schnittstelle (V.24-Schnittstelle)	477
16.1.1	Übertragungsmedien	477
16.1.2	Leitungsbelegung und Steckerverbindung der RS232C-Schnittstelle	478
16.1.3	Pegelfestlegung und deren logische Zuordnung	481
16.1.4	Logikdefinition für Datenleitungen	481
16.1.5	Logikdefinition für Steuer- und Meldeleitungen	481
16.1.6	Synchronisierung	482
16.1.7	Handshake-Verfahren (Quittierungsverfahren)	483
16.1.8	Software-Handshaking	483
16.1.9	Hardware-Handshaking	485
16.1.10	Hardware-Realisierung von seriellen Schnittstellen	485
16.2	Kenngrößen der seriellen Datenübertragung	488
16.3	Die RS485-Schnittstelle	489
16.3.1	Eine Twisted-Pair-Leitung	490
16.3.2	Zwei Twisted-Pair-Leitungen	490
16.4	Die 20 mA-Stromschleife	491
16.5	Die USB-Schnittstelle	491
16.6	Der IEC-Bus	493
16.6.1	Historie des IEC-Bus	493
16.6.2	Bezeichnungen des IEC-Bus	493
16.6.3	IEC-Bus-Komponenten	494
16.6.4	Gerätegrundfunktionen	494

16.6.5	IEC-Bus-Leitungen	495
16.6.6	Bus-Logik	497
16.6.7	Handshake-Verfahren (Dreidraht-Handshake)	498
16.6.8	Nachrichtenarten	501
16.6.9	Schlußzeichen	505
16.6.10	Statusabfrage	506
16.6.11	IEC-Bus-Hardware	507
16.7	VXI-Bus, PXI-Bus und MXI-Bus	508
16.7.1	VXI-Bus	510
16.7.2	Resource Manager (System Manager)	511
16.7.3	Commander	511
16.7.4	Servant	511
16.7.5	Busgliederung/Teilbusse	512
16.7.6	VXI- und IEC-Bus	512
16.7.7	PXI-Bus	512
16.7.8	PCI-Express	514
16.7.9	MXI-Bus	515
16.7.10	Historie der bisher diskutierten Bus-Standards	516
17	Meßdatenerfassung im Feld	517
17.1	Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	517
17.1.1	Aufbau einer SPS	517
17.1.2	Programmstruktur	517
17.1.3	Permanent-zyklischer Betrieb	518
17.1.4	Ausnahmen vom permanent-zyklischen Betrieb	519
17.1.5	Besonderheiten der Programmierung	519
17.1.6	Programmiersprachen für SPS nach IEC 61131-3	520
17.1.7	Beispiele für die IEC-genormten SPS- Programmiersprachen	522
17.2	Neue Entwicklungen bei Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS)	528
17.2.1	Vernetzung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen	528
17.2.2	Visualisierung von SPS-Daten und -Prozessen	532
17.3	Hierarchie industrieller Bussysteme	536
17.4	Vorschrift für eine einheitliche Kommunikation: Das ISO-Schichtenmodell	537
17.5	Netzwerktopologien	539
17.6	Bus-Zugriffsverfahren	540
17.6.1	Klassifizierung der Bus-Zugriffsverfahren	541
17.7	Modulationsverfahren und Bitcodierung	542
17.7.1	Alternierende Puls Modulation (APM)	542
17.7.2	Fehlererkennung und Datensicherung	542
17.7.3	Bitcodierung	544
17.8	Schnittstellenkonverter	545

17.9	Der Feldbus (FAN).....	546
17.9.1	ASI-Bus.....	548
17.9.2	CAN.....	550
17.9.3	PROFIBUS-DP.....	552
17.9.4	FIP-Bus.....	555
17.9.5	INTERBUS-S.....	556
17.9.6	BITBUS.....	558
17.9.7	EIB (European Installation Bus).....	560
17.9.8	LON (Local Operating Network).....	562
17.9.9	DIN-Meßbus.....	563
17.10	Primäre Sensorelement-Schnittstelle (PrimSens).....	564
18	Vernetzung von Meßdatenrechnern (Industrie-LAN, WAN)	569
18.1	IP-Adressen.....	570
18.2	Subnetzmasken.....	571
18.3	Internet-Protokoll (IP).....	572
18.4	Transmission Control Protocol (TCP).....	572
18.5	Echtzeitfähigkeit des Ethernet.....	572
18.6	Übergeordnete Kommunikationsebenen.....	573
18.7	Physikalische Ethernet-Übertragung.....	573
18.8	Ethernet-Telegrammstruktur.....	574
18.9	Verbindung mehrerer lokaler Netze.....	574
18.10	Standortübergreifende Vernetzung.....	576
18.10.1	Breitband-ISDN.....	576
18.10.2	Datex-P.....	577
18.10.3	GSM.....	577
18.10.4	Powerline-Kommunikation (Power Line Communication, PLC).....	578
18.10.5	Satellitenkommunikation.....	579
18.10.6	Metropolitan Area Network (MAN).....	580
18.10.7	Wide Area Network (WAN).....	580
18.10.8	Hochgeschwindigkeits-Glasfasernetz FDDI.....	580
18.11	Rechnernetze zur Meßdatenübertragung.....	581
18.11.1	Spezielle Bussysteme zur Meßdatenerfassung.....	581
18.11.2	Vernetzung von Meßdatenerfassungssystemen mittels Ethernet.....	582
18.12	Virtuelle Instrumentierung auf der Basis von USB-Meßmodulen	586
18.12.1	Funktionsprinzip.....	586
18.12.2	Beispiele für USB-Meßgeräte.....	587
18.13	Ethernet-Nutzung zur Meßdatenerfassung.....	591
18.13.1	LXI - Ein neuer Standard für die Meßtechnik.....	591
18.13.2	Die technische Basis von LXI.....	591
18.13.3	Die 3 Geräteklassen A, B und C des LXI-Standards...	592
18.13.4	Triggermöglichkeiten von LXI-Geräten.....	593
18.13.5	Triggerung gemäß IEEE-1588.....	595

18.13.6 Die Situation des LXI-Gerätemarktes	596
18.14 VPN - Virtual Private Network	597
19 Programmierung von Meßdatenerfassungssystemen	601
19.1 Allgemeine Bemerkungen	601
19.2 IEC- und VXI-Bus-Kommunikation, SCPI-Standard	602
19.2.1 Syntax der SCPI-Sprache	604
19.2.2 SCPI-Datenformate	607
19.3 Einsatz kommerzieller Software	608
19.4 Kategorien von Softwarelösungen	608
19.4.1 Dialoggeführte Komplettpakete (Fertiglösungen)	608
19.4.2 Modul-Bibliotheken	609
19.4.3 Graphikorientierte Entwicklungssysteme (Programmgeneratoren)	609
19.4.4 Systeme mit speziellen Kommandosprachen	610
19.5 LabVIEW	611
19.6 LabWindows	615
19.7 MATLAB	617
20 Gebäudeautomatisierung (Smart Home)	621
20.1 Struktur des Gesamtsystems	622
20.2 Datenerfassung mit frequenzanaloger Schnittstelle	623
20.3 Datenerfassung mit digitaler Schnittstelle	625
20.4 Datenerfassung mit energieautarker digitaler Funkschnittstelle	626
20.5 Lokale und weltweite Vernetzung	629
20.5.1 LAN - lokales Netzwerk	629
20.5.2 Standortübergreifende Vernetzung	630
20.5.3 Weltweite Vernetzung	631
20.6 Software	631
Literaturverzeichnis	635
Index	641