

Reinhard Lerch

Elektrische Messtechnik

Analoge, digitale
und computergestützte Verfahren

2., neu bearbeitete
und erweiterte Auflage

Mit 452 Abbildungen

 Springer

Professor Dr. Reinhard Lerch
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Sensorik
Paul-Gordan-Str. 3/5
91052 Erlangen
e-mail: reinhard.lerch@lse.eei.uni-erlangen.de

ISSN 0937-7433

ISBN 3-540-21870-X Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer-Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science + Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1996, 2005
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. din, vdi, vde) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Einbandgestaltung: Design & Production, Heidelberg

Satz und Umbruch: Camera ready-Vorlage vom Autor

Gedruckt auf säurefreiem Papier 07/3111 - 5 4 3 2 1 SPIN 11369301

Vorwort zur zweiten Auflage

Die zweite Auflage trägt insbesondere den aktuellen Entwicklungen im Bereich *Computerunterstützte Meßdatenerfassung* Rechnung. Behandelt werden alle wesentlichen Hard- und Software-Komponenten der modernen rechnergestützten Meßdatenerfassung. So werden beispielsweise die weltweite Vernetzung von Meßdaten- und Prozeßrechnern wie auch die Meßdatenerfassung unter Zuhilfenahme von *Virtual Private Networks* besprochen.

Die zweite Auflage wurde ebenfalls erweitert auf dem Gebiet der Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzwerken, was der detaillierten Erläuterung der dynamischen Meßfehler und ihrer Korrekturmöglichkeiten zugute kommt. Auch die Analyse und Messung von nichtlinearen Bauelementen wurde in den Stoff aufgenommen.

Bei der Erweiterung des Buches haben mich die Mitarbeiter des Lehrstuhls für Sensorik der Universität Erlangen-Nürnberg mit großem Engagement unterstützt. In allererster Linie bin ich Herrn Dr.-Ing. Alexander Sutor und Herrn Dipl.-Ing. Martin Meiler für ihre fachlichen Beiträge zu diesem Werk zu großem Dank verpflichtet. Für ihren unermüdlichen Einsatz bei der Erstellung des Manuskriptes und der Grafiken gilt Frau Cornelia Salley-Sippel und Frau Bettina Melberg mein besonderer Dank. An der Korrekturlesung des Werkes waren alle Mitarbeiter des Lehrstuhls sowie Herr Dr.-Ing. Günter Pretzl vom Lehrstuhl für Technische Elektronik und meine Ehefrau Elke beteiligt. Auch ihnen sei an dieser Stelle dafür herzlich gedankt. Dank gilt auch den Mitarbeitern des Springer-Verlages für die hervorragende Kooperation, insbesondere Frau Eva Hestermann-Beyerle und Frau Monika Lempe.

Erlangen, im Sommer 2004

Reinhard Lerch

Vorwort zur ersten Auflage

Die in der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts erfolgten innovativen Entwicklungen auf dem Gebiet der Elektrotechnik haben für die Elektrische Meßtechnik eine Vielzahl neuer Verfahren und Meßschaltungen mit sich gebracht. So basiert die Messung elektrischer und nicht-elektrischer Größen heute vorwiegend auf Schaltungen, die erst durch in jüngster Vergangenheit entwickelte elektronische Halbleiterbauelemente und integrierte Schaltkreise, wie beispielsweise Operationsverstärker, digitale Grundsaltungen und Analog-Digital- bzw. Digital-Analog-Umsetzer, ermöglicht wurden. Die Nutzung dieser modernen Elektronik und die enormen Fortschritte auf dem Gebiet der Digitalrechner haben zu einer sehr engen Verflechtung von Elektrischer Meßtechnik und Computertechnik bzw. Informatik geführt. Dies zeigt sich unter anderem in der Tatsache, daß die heutige Meßdatenerfassung und Meßsignalverarbeitung zunehmend auf Digitalrechner oder digitale Signalprozessoren verlagert werden und zum Teil in Software implementiert sind. Nachdem in den letzten Jahren eine Vielzahl von leistungsfähigen Sensoren zur Detektion nicht-elektrischer Meßgrößen entwickelt wurde, verstärkt sich der Trend, daß viele nicht-elektrotechnische Wissenschaftszweige, wie z. B. der Maschinenbau und die Verfahrenstechnik, ihre meßtechnischen Probleme mit rein elektrotechnischen bzw. informationstechnischen Mitteln lösen.

Es wurde versucht, dieser Entwicklung mit der Struktur des vorliegenden Werkes Rechnung zu tragen, ohne die klassischen Grundlagen zu vernachlässigen. So werden nach einem einführenden Kapitel über *Meßfehler*, die konventionellen *elektromechanischen Meßwerke* besprochen, welche zwar zunehmend von digitalen Meßgeräten abgelöst werden, deren grundlegende Wandlungsmechanismen aber für das Gebiet der elektromechanischen Meßwertaufnehmer (Sensoren) von großer Bedeutung sind. Nach den Abschnitten zur *Messung von elektrischer Spannung*, *elektrischem Strom* und *elektrischer Impedanz* folgen als thematische Schwerpunkte die Methoden und Verfahren sowie die daraus resultierenden elektronischen Schaltungen der modernen Elektrischen Meßtechnik. Diese werden in den Kapiteln *Operationsverstärker*, *Darstellung elektrischer Signale*, *Digitale Meßtechnik*, *Messung von Frequenz*

und Zeit sowie Meßsignalverarbeitung und Rechnergestützte Meßdatenerfassung behandelt.

Die in diesem Buch angesprochenen Themen und Fragestellungen decken den Stoff einer einführenden Vorlesung *Elektrische Meßtechnik* ab. Darüberhinaus ist die Thematik einer weiterführenden Vorlesung *Rechnergestützte Meßdatenverarbeitung und Meßsignalverarbeitung* enthalten, die als Wahlvorlesung für Studenten höherer Semester Bestandteil des an der Johannes Kepler Universität Linz im Jahre 1990 eingerichteten Diplomingenieurstudienganges *Mechatronik* ist. Das Buch wendet sich jedoch nicht nur an Studenten der Fachrichtungen Elektrotechnik, Mechatronik, Maschinenbau, Informationstechnik, Physik und Chemie sondern auch an die bereits auf dem Gebiet der Meßtechnik praktisch tätigen Ingenieure und Naturwissenschaftler, die ihr Wissen über Meßtechnik auffrischen bzw. vertiefen wollen. Mit dem vorliegenden Werk sollen sowohl Kenntnisse über die bei der Messung elektrischer Größen eingesetzten Standardverfahren vermittelt als auch der neueste Stand der zur modernen Elektrischen Meßtechnik zählenden computergestützten Meßdatenerfassung und Meßsignalverarbeitung beschrieben werden.

Das Buch ist in Verbindung mit dem Begleitwerk „Übungen zur Elektrischen Meßtechnik“ (R. Lerch; M. Kaltenbacher; F. Lindinger: *Übungen zur Elektrischen Meßtechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1996) zum Selbststudium geeignet. In diesem Übungsbuch werden neben kurzen Repetitorien zahlreiche praktische Aufgaben und weiterführende Beispiele zu dem gesamten im Lehrbuch behandelten Stoff angeboten. Für das Verständnis des in den beiden genannten Werken dargebotenen Stoffes werden lediglich Grundkenntnisse auf den Gebieten Elektrotechnik, Mathematik sowie Schaltungstechnik erwartet.

Bei der Ausarbeitung des Manuskriptes habe ich viele Anregungen und wesentliche Unterstützung von allen am Institut für Elektrische Meßtechnik der Universität Linz tätigen Mitarbeitern erfahren. In allererster Linie bin ich Herrn Dipl.-Ing. Manfred Kaltenbacher und Herrn Dipl.-Ing. Franz Lindinger für ihre wesentlichen fachlichen Beiträge zu diesem Werk sowie ihren unermüdlichen Einsatz im Zusammenhang mit der Erstellung des Manuskriptes zu größtem Dank verpflichtet. Die wahrlich nicht immer einfachen Aufgaben des computergerechten Textschreibens sowie der Anfertigung von Abbildungen lagen in den Händen von Frau Waltraud Kratzer, die die immer wieder anstehenden Texterweiterungen und Änderungen der Abbildungen mit großem Engagement und Sachverstand vorgenommen hat. Ihr gebührt mein herzlicher Dank, ebenso wie Frau Sylvia Preßl, die ebenfalls viele der Grafiken angefertigt hat, wie auch Frau Ingrid Hagelmüller, die für die Texteingabe sowie die Erstellung der Abbildungen der ersten Manuskriptversion verantwortlich war. All denjenigen, die an der Korrekturlesung dieses Werkes beteiligt waren und Verbesserungsvorschläge eingebracht haben, d. h. meinen Kollegen, meinen Assistenten, insbesondere den Herren Dipl.-Ing. Todor Sheljaskov und Dipl.-Ing. Roland Exler, den Linzer Mechatronik-Studenten sowie meiner Ehefrau

Elke, möchte ich ebenfalls meinen herzlichen Dank für ihren großen Einsatz aussprechen.

Mein Dank gilt auch dem Springer-Verlag, insbesondere Herrn Dr. Hubertus Riedesel, der die Anregung zur Abfassung des vorliegenden Werkes gab, sowie seinen Mitarbeiterinnen Frau Marianne Ozinkowski und Frau Gaby Maas für ihre Unterstützung bei der Erstellung des kamerafertigen Manuskriptes. Allen eben genannten Personen möchte ich auch danken für ihr Verständnis und ihre Geduld bei der mehrmals verzögerten Abgabe des Manuskriptes.

Da es erwartungsgemäß auch bei noch so sorgfältiger Bearbeitung des Textes nicht möglich sein dürfte, die Erstauflage eines solchen Buches fehlerfrei zu halten, möchte ich mich schon vorab bei allen Lesern für diese Fehler entschuldigen und sie ermutigen, von ihnen eventuell entdeckte Fehler an die folgende Adresse mitzuteilen:

O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Lerch
Institut für Elektrische Meßtechnik
Johannes Kepler Universität Linz
Altenberger Straße 69
A-4040 Linz
email: R.Lerch@jk.uni-linz.ac.at

Linz, im Januar 1996

Reinhard Lerch

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	8
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	Verschiebung im Zeitbereich (Oberbereich)	33
3.5.6	Verschiebung im Laplace-Bereich (Unterbereich).....	33
3.5.7	Dehnung bzw. Stauchung.....	34
3.5.8	Anfangswert-Theorem	34
3.5.9	Endwert-Theorem	34
3.6	Analyse eines RC-Netzwerkes mittels Laplace-Transformation.	34
3.7	Die Rücktransformation von Laplace-Transformierten in den Zeitbereich	35
3.8	Lösung von linearen Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten	36
3.9	Berechnung von Einschwingvorgängen in elektrischen Netzwerken mit konzentrierten linearen passiven Bauelementen	40
3.10	Rücktransformation mittels Residuenmethode - Heavisidescher Entwicklungssatz	50
3.11	Vierpol-Übertragungsfunktion im Zeit- und Frequenzbereich..	54
3.12	Beschreibung von linearen zeitinvarianten Netzwerken durch ihre Sprungantwort.....	58
3.13	Bode-Diagramme	59
3.13.1	Regeln für Bode-Diagramme	62
4	Nichtlineare Bauelemente, Schaltungen und Systeme	71
4.1	Nichtlineare Bauelemente	71
4.1.1	Nichtlinearer Widerstand	71
4.1.2	Nichtlineare Induktivität	74
4.1.3	Messung von Hysteresekurven	79
4.1.4	Nichtlineare Kapazität	80
4.1.5	Gesteuerte Quellen	82
4.2	Analyse nichtlinearer elektrischer Netzwerke	83
5	Meßfehler	89
5.1	Systematische Meßfehler	90
5.2	Zufällige Meßfehler	91
5.2.1	Normalverteilung, Mittelwert, Standardabweichung ...	91
5.2.2	Vertrauensbereich für den Schätzwert	94
5.2.3	Fortpflanzung zufälliger Fehler	97
5.3	Genauigkeitsklassen bei Meßgeräten	98
5.4	Dynamische Meßfehler	99
5.4.1	Das Übertragungsverhalten von Meßsystemen.....	99
5.4.2	Definition des dynamischen Meßfehlers	104
5.4.3	Bestimmung des dynamischen Meßfehlers.....	105
5.4.4	Meßsystem mit Tiefpaßverhalten	106

6	Analoges Messen elektrischer Größen	111
6.1	Elektromechanische Meßgeräte	111
6.1.1	Drehspulmeßwerk	112
6.1.2	Galvanometer	117
6.1.3	Elektrodynamisches Meßwerk	120
6.1.4	Dreheisenmeßwerk	123
6.1.5	Drehspulquotientenmeßwerk (Kreuzspulmeßwerk)	124
6.1.6	Drehmagnetmeßwerk	126
6.1.7	Elektrostatisches Meßwerk	127
6.1.8	Schaltzeichen für Meßgeräte	129
6.2	Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	130
6.2.1	Messung von Gleichströmen	130
6.2.2	Messung von Gleichspannungen	133
6.2.3	Gleichzeitiges Messen von Strom und Spannung	135
6.3	Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	137
6.3.1	Begriffsdefinitionen	137
6.3.2	Gleichrichtung	139
6.3.3	Messung des Scheitelwertes (Spitzenwert, Peak Value)	140
6.3.4	Messung des Gleichrichtwertes	142
6.3.5	Messung des Effektivwertes	143
6.3.6	Meßwandler	145
7	Meßverstärker	153
7.1	Operationsverstärker	154
7.1.1	Idealer Operationsverstärker	154
7.1.2	Realer Operationsverstärker	155
7.1.3	Definitionen von Operationsverstärker-Kenngrößen	158
7.1.4	Operationsverstärker-Grundsaltungen	165
7.2	Spezielle Meßverstärker	177
7.2.1	Differenzverstärker	177
7.2.2	Instrumentenverstärker (Instrumentierungsverstärker)	178
7.2.3	Zerhacker-Verstärker	180
7.2.4	Ladungsverstärker	181
7.3	Rauschen von Meßverstärkern	182
8	Messung der elektrischen Leistung	193
8.1	Leistungsmessung im Gleichstromkreis	193
8.2	Leistungsmessung im Wechselstromkreis	195
8.2.1	Begriffsdefinitionen	195
8.2.2	Leistungsmessung im Einphasennetz	195
8.2.3	Leistungsmessung in Drehstromsystemen	197
8.3	Messung der elektrischen Arbeit	205

9	Messung von elektrischen Impedanzen	209
9.1	Messung von ohmschen Widerständen	209
9.1.1	Strom- und Spannungsmessung	209
9.1.2	Vergleich mit einem Referenzwiderstand	210
9.1.3	Verwendung einer Konstantstromquelle	212
9.1.4	Verwendung eines Kreuzspulinstrumentes	213
9.2	Kompensationsschaltungen	214
9.2.1	Gleichspannungskompensation	214
9.2.2	Gleichstromkompensation	215
9.3	Gleichstrom-Meßbrücken	216
9.3.1	Gleichstrom-Ausschlagbrücken	216
9.3.2	Gleichstrom-Abgleichbrücken	219
9.4	Messung von Schein- und Blindwiderständen	219
9.5	Wechselstrom-Meßbrücken	223
9.5.1	Wechselstrom-Abgleichbrücken	223
9.5.2	Einflüsse von Erd- und Streukapazitäten	227
9.5.3	Halbautomatischer Brückenabgleich	228
9.5.4	Wechselstrom-Ausschlagbrücken	231
10	Darstellung des Zeitverlaufes elektrischer Signale	235
10.1	Analoges Elektronenstrahl-Oszilloskop	235
10.1.1	Aufbau und Funktion der Elektronenstrahl-Röhre	235
10.1.2	Zeitablenkung und Triggerung	239
10.1.3	Funktionsgruppen eines Analog-Oszilloskops	242
10.1.4	Sampling-Oszilloskop	245
10.2	Spannungsteiler in Elektronenstrahl-Oszilloskopen	248
10.3	Fehler bei der analogen Elektronenstrahl-Oszilloskopie	249
10.3.1	Statische Fehler (Fehler der Ablenkkoeffizienten)	249
10.3.2	Linearitätsfehler	251
10.3.3	Dynamische Fehler des Oszilloskops	252
10.4	Digital-Speicheroszilloskop	259
10.4.1	Prinzipielle Funktionsweise	259
10.4.2	Wiedergabe des aufgezeichneten Bildes	261
10.4.3	Betriebsarten des Digital-Speicheroszilloskops	263
10.4.4	Einsatz von Digital-Oszilloskopen in Verbindung mit Computern	264
10.5	Vergleich Analog- und Digital-Oszilloskope	264
10.6	Digital-Phosphor-Oszilloskop	264
11	Digitale Meßtechnik	267
11.1	Duales Zahlensystem und Binärcodes	267
11.1.1	Dualzahlendarstellung	267
11.1.2	BCD-, Hexadezimal- und Gray-Code	268
11.1.3	Fehlererkennung und Fehlerkorrektur	268
11.2	Binäre Signale und ihre Verknüpfung	269

11.2.1	Grundregeln bei der logischen Verknüpfung	269
11.2.2	Digitale Grundschaltungen (Gatterschaltungen)	270
11.2.3	Digitale Addierer	274
11.3	Bistabile Kippschaltungen	275
11.3.1	RS-Flip-Flop	276
11.3.2	Taktzustandgesteuertes RS-Flip-Flop	277
11.3.3	Taktflankengesteuertes RS-Flip-Flop	277
11.3.4	Taktzustandgesteuertes D-Flip-Flop (Data-Latch)	278
11.3.5	Taktflankengesteuertes D-Flip-Flop	280
11.3.6	Taktflankengesteuertes JK-Flip-Flop	281
11.3.7	Taktflankengesteuertes T-Flip-Flop	282
11.4	Monostabile Kippstufe	283
11.5	Zähler-Schaltungen	284
11.5.1	Dualzähler	285
11.5.2	BCD-Zähler	287
11.6	Digital-Analog-Umsetzung	288
11.6.1	Grundlagen und Kenngrößen	288
11.6.2	Schaltungstechnische Realisierungen	290
11.6.3	Fehler bei der Digital-Analog-Umsetzung	294
11.7	Analog-Digital-Umsetzung	299
11.7.1	Abtastung (Sampling)	299
11.7.2	Abtast-Halte-Schaltungen	301
11.7.3	Direktvergleichende Analog-Digital-Umsetzer	303
11.7.4	Analog-Digital-Umsetzung mit Delta-Sigma-Modulator	310
11.7.5	Time-Division-Multiplizierer (Impulsbreiten-Multiplizierer, Sägezahn-Multiplizierer)	318
11.7.6	Analog-Digital-Umsetzung mit Zeit oder Frequenz	321
11.7.7	Vergleich der Grundprinzipien	328
11.7.8	Fehler bei der Analog-Digital-Umsetzung	329
11.8	Digital-Multimeter (DMM)	333
12	Die Messung von Frequenz und Zeit	337
12.1	Mechanische Frequenzmessung	338
12.2	Digitale Frequenzmessung	339
12.3	Digitale Zeitmessung	340
12.3.1	Zeitintervallmessung (Zeitdifferenzmessung)	340
12.3.2	Periodendauermessung	344
12.4	Digitale Phasenwinkelmessung	344
12.5	Rechnender Zähler	345
12.6	Zeit-Spannungs-Umsetzer (t/U-Umsetzer)	346
12.7	Frequenz-Spannungs-Umsetzer (f/U-Umsetzer)	347
12.8	Oszillatoren	348
12.8.1	Grundlagen	348
12.8.2	Harmonische Oszillatoren	350
12.8.3	LC-Oszillator	351

12.8.4	Relaxationsoszillatoren	353
12.8.5	Quarzoszillator	356
12.8.6	Operationsverstärker-Schaltung eines Quarzoszillators ..	360
12.8.7	Fehler von Schwingquarzen	360
12.9	Fehler bei der digitalen Zeitintervall- bzw. Frequenzmessung ..	362
12.10	Zeitzeichensender und Funknavigation	366
12.10.1	DCF-77 Zeitzeichensender	366
12.10.2	NAVSTAR/GPS-Satellitennavigation	366
12.10.3	Galileo-Satellitennavigation	370
13	Meßsignalverarbeitung	373
13.1	Aufgaben und Bedeutung	373
13.2	Signalarten und Analyseformen	375
13.3	Multiplizieren, Dividieren, Quadrieren, Radizieren	376
13.4	Ermittlung des Effektivwertes	378
13.5	Bestimmung von Mittelungswerten	381
13.6	Kenngrößen nicht-sinusförmiger periodischer Signale	383
13.7	Messung von Signaleigenschaften mittels Korrelationsfunktion	386
13.8	Äußere Störeinträge	393
14	Rechnergestützte Meßdatenerfassung	397
14.1	Grundstrukturen von rechnergestützten Meßsystemen	397
14.2	Basis-Hardware zur Meßdatenerfassung	404
14.2.1	Multifunktions-Einsteckkarten	406
14.2.2	Multipllexer	409
14.2.3	Störungen infolge Erdschleifen und Einkopplungen	409
14.2.4	Serielle Schnittstellen	412
14.2.5	Parallelbussysteme	413
14.2.6	Datenlogger	413
14.3	Grundtypen des Datentransfers	413
14.4	Meßdatenerfassung im Labor	414
14.4.1	Die serielle RS232C-Schnittstelle (V.24-Schnittstelle) ..	416
14.4.2	Kenngrößen der seriellen Datenübertragung	426
14.4.3	Die RS485-Schnittstelle	428
14.4.4	Die 20 mA-Stromschleife	430
14.4.5	Die USB-Schnittstelle	430
14.4.6	Der IEC-Bus	431
14.4.7	VXI-Bus, PXI-Bus und MXI-Bus	448
14.5	Meßdatenerfassung im Feld	455
14.5.1	Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	455
14.5.2	Hierarchie industrieller Bussysteme	465
14.5.3	Vorschrift für eine einheitliche Kommunikation: Das ISO-Schichtenmodell	467
14.5.4	Netzwerktopologien	469
14.5.5	Bus-Zugriffverfahren	469

14.5.6	Modulationsverfahren und Bitcodierung	471
14.5.7	Schnittstellenkonverter	474
14.5.8	Der Feldbus (FAN)	475
14.5.9	Primäre Sensorelement-Schnittstelle (PrimSens)	493
14.6	Vernetzung von Meßdatenrechnern (Industrie-LAN, WAN) ...	496
14.6.1	IP-Adressen	496
14.6.2	Subnetzmasken	498
14.6.3	Internet-Protokoll (IP)	498
14.6.4	Transmission Control Protocol (TCP)	499
14.6.5	Echtzeitfähigkeit des Ethernet	499
14.6.6	Übergeordnete Kommunikationsebenen	499
14.6.7	Physikalische Ethernet-Übertragung	500
14.6.8	Ethernet-Telegrammstruktur	501
14.6.9	Verbindung mehrerer lokaler Netze	502
14.6.10	Standortübergreifende Vernetzung	502
14.6.11	Rechnernetze zur Meßdatenübertragung	507
14.7	Programmierung von Meßdatenerfassungssystemen	512
14.7.1	Allgemeine Bemerkungen	512
14.7.2	IEC- und VXI-Bus-Kommunikation, SCPI-Standard ..	513
14.8	Einsatz kommerzieller Software	519
14.8.1	Kategorien von Softwarelösungen	519
14.8.2	LabView	522
14.8.3	LabWindows	524
14.8.4	MATLAB	525
14.9	Anwendungsbeispiel: Hausautomatisierung	528
14.9.1	Struktur des Gesamtsystems	528
14.9.2	Datenerfassung	529
14.9.3	Lokale und weltweite Vernetzung	531
14.9.4	Software	533
	Literaturverzeichnis	535
	Index	541
	Index	561

Umfang und Bedeutung der Elektrischen Meßtechnik

1.1 Zur Historie und Bedeutung der Meßtechnik

Die meßtechnische Erfassung von physikalisch-technischen Gegenständen und Prozessen stellt zusammen mit der logischen Denkfähigkeit des Menschen, also insbesondere auch der Fähigkeit, diese Objekte und Vorgänge mathematisch zu beschreiben, eine wesentliche Grundlage aller Natur- und Ingenieurwissenschaften dar. Schon der griechische Philosoph Platon (427-347 v. Chr.) hat auf die große Bedeutung der Meßtechnik hingewiesen, als er im X. Buch seines Werkes „Der Staat“ schrieb [86]:

„Dieselben Gegenstände erscheinen uns krumm oder gerade, je nachdem wir sie in oder außer Wasser erblicken, ebenso hohl oder erhaben infolge der Täuschung unseres Gesichtssinnes durch die Farben; und all dies deutet auf eine Verwirrung in der Seele hin.“ (...)

‘Messen, Zählen und Wägen zeigen sich dagegen als die willkommensten Helfer, so daß in uns nicht das scheinbar Größere oder Kleinere oder Zahlreichere oder Schwerere von Ausschlag ist, sondern das Rechnende, Messende, Wägende.’

‘Wie auch nicht!’

‘Das ist die Aufgabe des vernünftigen Teiles in unserer Seele.’ (...)

‘Der Teil, der auf Maß und Berechnung vertraut, ist wohl der beste Teil der Seele?’

‘Natürlich!’

‘Sein Gegenteil gehört zu dem Schwachen in uns?’

‘Notwendigerweise!’“

Zwischen der Meßtechnik, deren grundlegende Aufgabe die experimentelle Bestimmung physikalischer Größen ist, und der Entwicklung der Industrielandschaft aber auch der kulturellen Entwicklung bestehen seit jeher große Abhängigkeiten. Die Meßtechnik spielte schon in der Antike eine zentrale Rolle, insbesondere im Zusammenhang mit Meßgrößen, die Bestandteil des täglichen Leben sind, wie z. B. Entfernungen oder das Gewicht von Waren. Die entsprechenden Maßeinheiten lieferte oft der menschliche Körper, wie u. a.

die in früheren Zeiten gebräuchlichen Einheiten „Fuß“, „Spanne“ oder „Klaffer“ zeigen. Wie die Funde von Wägesteinen belegen, war das für die Entwicklung der Ware-Geld-Beziehung notwendige, auf Gewichtseinheiten basierende Wiegen bereits Jahrtausende vor Christus eingeführt. Eines der ältesten, aus Babylon stammenden Maßsysteme enthielt auch schon Einheiten für die Größen „Länge“ (babylonische Elle), „Fläche“, „Volumen“ und „Gewicht“. Um dem im Laufe der Jahrhunderte entstandenen Wildwuchs an Maßeinheiten Einhalt zu gebieten, war es eine Forderung der Französischen Revolution, daß einheitliche Maße vereinbart werden sollten. Schließlich wurde im Jahre 1799 die Längeneinheit „Meter“ als der vierzigmillionste Teil des Erdmeridians zunächst in Frankreich, später auch in Preußen und Sachsen, festgeschrieben, während von der industriellen Entwicklung Englands die bekannten angelsächsischen Längenmaßeinheiten ausgingen. Bis ins 19. Jahrhundert hinein beschränkte man sich auf die Messung geometrischer, mechanischer und thermischer Größen. Für die quantitative Erfassung weiterer wichtiger Meßgrößen, wie z. B. die Ionendosis oder die Energiedosis von radioaktiver Strahlung, standen bis dahin keine entsprechenden Meßgeräte zur Verfügung; es bestand jedoch schon die Möglichkeit ihres qualitativen Nachweises.

Die Meßtechnik hat auch ganz wesentlich zur Weiterentwicklung aller Natur- und Ingenieurwissenschaften beigetragen. So verhalf beispielsweise die Zeitmeßtechnik zu Aussagen über Unregelmäßigkeiten bei der Erdrotation. Heute ist die Meßtechnik als ein zentrales Element der modernen Technologie- und Industrielandschaft etabliert. Sie dient dort neben dem Warenaustausch vor allem der Forschung und Entwicklung, der Fertigung sowie der Qualitätssicherung von Produkten. Eine Vielzahl technischer Funktionsabläufe muß ständig meßtechnisch kontrolliert werden, um beispielsweise die gewünschte Qualität in der Fertigung zu erreichen oder auch um die notwendige Sicherheit und Umweltverträglichkeit von Prozessen zu gewährleisten.

Ein Beispiel aus dem Bereich des Umweltschutzes zeigt auch, daß sich manche der dort anstehenden Aufgaben erst mit der Entwicklung und Bereitstellung eines hochwertigen Meßverfahrens lösen lassen. So wurde am Institut für Hochfrequenztechnik der Universität Erlangen ein Empfänger für elektromagnetische Submillimeterwellen (Frequenzen im Terahertzbereich) entwickelt, welcher in Flugzeugen, die in großer Höhe fliegen, eingesetzt werden kann, um dort Schadstoffkonzentrationen zuverlässig zu messen. Diese Messungen basieren im wesentlichen auf der Detektion elektromagnetischer Strahlung, die bei einer Frequenz von 2,5 Terahertz von sog. Hydroxyl-Ionen emittiert wird. Diese Hydroxyl-Ionen werden neben den Fluorkohlenwasserstoffen (FCKW) als eine Substanz angesehen, die zum Abbau der Ozonschicht führt.

Viele technische Fortschritte spiegeln sich in der Entwicklung von Meßverfahren und dazugehörigen Meßgeräten wider, die ihrerseits wiederum zu einer Verbesserung des Kenntnisstandes auf dem Gebiet der Elektrotechnik beitragen. Eines der jüngsten Beispiele dafür ist der *Quanten-Halleffekt*, für dessen Entdeckung im Jahre 1985 der Nobelpreis an Prof. von Klitzing vergeben wurde. Der Effekt konnte nur durch Bereitstellung und Nutzung einer sehr

hochwertigen Meßtechnik entdeckt werden. Andererseits kann der Quanten-Halleffekt wiederum zur hochgenauen Definition der Einheit des ohmschen Widerstandes genutzt werden, womit er zu einer größeren Präzision in der Elektrischen Meßtechnik beiträgt.

In nahezu allen Disziplinen der Technik geht die entsprechende Meßtechnik zunehmend in eine rein elektrische Meßwertverarbeitung über. Der allgemeine Trend besteht darin, für die verschiedenen Meßaufgaben Meßwertaufnehmer zu entwickeln, welche die unterschiedlichsten nicht-elektrischen Meßgrößen detektieren und in entsprechende elektrische Signale umsetzen. Die weitere Verarbeitung dieser nunmehr elektrischen Signale (Meßwerte) ist dann weitgehend standardisiert und mittlerweile ein fester Bestandteil der Elektrischen Meßtechnik geworden. Der große Vorzug der Elektrischen Meßtechnik liegt dabei vor allem in der großen Präzision, mit der sich elektrische Signale, etwa im Gegensatz zu mechanischen Größen, bei relativ geringem Aufwand verarbeiten und speichern lassen.

Auch die Tatsache, daß sich die beiden Größen „Frequenz“ und „Zeit“ mit Hilfe der Methoden der Elektrischen Meßtechnik mit großer Genauigkeit bestimmen lassen, bildet eine weitere Basis ihres Erfolges. So beruht beispielsweise das Prinzip des heute weltweit angewendeten Navigationssystems GPS (Global Positioning System) auf einer präzisen Messung von Zeiten, in diesem Fall von Laufzeiten, die ein elektromagnetisches Signal von einem in bekannter Position befindlichen Satelliten bis zu einem Empfangsort benötigt. An diesem Empfangsort befindet sich ein portabler Empfänger, dessen geometrische Breiten-, Längen- und Höhenkoordinaten aus diesen Zeitmessungen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden können.

1.2 Der Begriff des Messens

Unter *Messen* versteht man das quantitative Erfassen einer Größe, der sog. *Meßgröße*. Präziser formuliert heißt Messen, eine zu messende Größe als Vielfaches einer allgemein anerkannten Einheitsgröße derselben physikalischen Dimension zu bestimmen, und zwar durch experimentellen Vergleich mit einer Maßverkörperung dieser Einheit. Dabei bedienen wir uns sog. *Meßgeräte*. Meßgeräte können insbesondere auch den Teil der Natur erschließen helfen, für den unsere Sinne keine Empfindungen haben, wie z. B. der Schall im Ultraschallbereich oder alle Arten von ionisierender Strahlung. Zur Durchführung von Messungen müssen die folgenden drei Voraussetzungen erfüllt sein:

- Existenz eines Zahlensystems
- Definition einer Meßgröße
- Festlegung der Einheit.

Die Elektrische Meßtechnik behandelt zunächst die Messung rein elektrischer Größen, wie Spannung, Strom, elektrische Leistung und Impedanz (Widerstand, Induktivität, Kapazität). Nach der eigentlichen Gewinnung (*Detektion*) des Meßsignals wird dieses verarbeitet, d. h. es wird u. a. *kompensiert*,

verstärkt, übertragen, linearisiert oder *digitalisiert*, bevor das Meßergebnis (*Meßwert*) entweder

- auf einer Anzeige (analog oder digital) *ausgegeben*,
- mittels Schreiber oder Drucker *dokumentiert* oder
- zur *Regelung* eines Prozesses benutzt wird.

Ein weiteres wichtiges Teilgebiet der Elektrischen Meßtechnik beschäftigt sich mit der Messung *nicht-elektrischer Größen*. Dazu bedient man sich sog. *Sensoren* (*Aufnehmer, Meßfühler, Detektoren*), welche die jeweilige physikalische Größe in ein elektrisches Signal umwandeln, das dann leicht mit bewährten Methoden der Elektrischen Meßtechnik weiterverarbeitet werden kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich die Elektrische Meßtechnik mit den folgenden Teilaufgaben beschäftigt:

- Gewinnung des Meßsignals, d. h. Detektion der (elektrischen oder nicht-elektrischen) Meßgröße und Umwandlung in ein für die weitere Verarbeitung geeignetes elektrisches Signal
- Verarbeitung und Übertragung des elektrischen Meßsignals
- Darstellung, Dokumentation und Speicherung der Meßwerte.

Die Verarbeitung elektrischer Meßsignale zeichnet sich gegenüber den Meßverfahren anderer Wissenschaftszweige durch folgende Vorzüge aus:

- leistungsarmes und damit rückwirkungsarmes Erfassen von Meßgrößen
- großer Meßbereichsumfang (hohe Dynamik)
- einfache Verarbeitbarkeit der Meßsignale mit Hilfe elektronischer Schaltungen
- leichte Übertragbarkeit und Speicherung der Meßsignale mit Standardverfahren der Nachrichtentechnik.

1.3 Begriffsdefinitionen in der Meßtechnik

1.3.1 Allgemeine Begriffe

Im folgenden werden die wichtigsten Begriffsdefinitionen der Meßtechnik nach DIN 1319 (Grundbegriffe der Meßtechnik), VDI/VDE 2600 (Metrologie, Meßtechnik) sowie DIN VDE 0410 (Bestimmungen für elektrische Meßgeräte) zusammengefaßt:

Messen ist der experimentelle Vorgang, durch den ein spezieller Wert einer physikalischen Größe als Vielfaches einer Einheit oder eines Bezugswertes ermittelt wird (DIN 1319).

Die *Meßgröße* ist die physikalische Größe, deren Wert durch eine Messung ermittelt werden soll (VDI/VDE 2600).

Der *Meßwert* ist der gemessene spezielle Wert einer Meßgröße, er wird als Produkt aus Zahlenwert und Einheit angegeben (DIN 1319).

Das *Meßergebnis* ist ein aus mehreren Meßwerten einer physikalischen Größe oder aus Meßwerten für verschiedene Größen nach einer festgelegten Beziehung ermittelter Wert oder Werteverlauf. Ein einzelner Meßwert kann aber auch bereits das Meßergebnis darstellen (VDI/VDE 2600).

Meßprinzip heißt die charakteristische physikalische Erscheinung, die bei der Messung benutzt wird (DIN 1319).

Meßverfahren nennt man die spezielle Art der Anwendung eines Meßprinzips (VDI/VDE 2600). Man unterscheidet dabei im wesentlichen zwischen dem Ausschlagverfahren, bei dem der Ausschlag oder die Anzeige eines Meßwertes ein Maß für die Meßgröße ist (idealerweise proportional), und dem Nullabgleichverfahren, bei dem die in Kap. 1.5.1 beschriebene Kompensationsmethode eingesetzt wird.

1.3.2 Meßgerät und Meßeinrichtung

Ein *Meßgerät* liefert oder verkörpert Meßwerte, auch die Verknüpfung mehrerer voneinander unabhängiger Meßwerte, z. B. das Verhältnis von Meßwerten (DIN 1319).

Eine *Meßeinrichtung* besteht aus einem Meßgerät oder mehreren zusammenhängenden Meßgeräten mit zusätzlichen Einrichtungen, die ein Ganzes bilden (DIN 1319).

Als *Hilfsgeräte* werden die Komponenten bezeichnet, die nicht unmittelbar der Aufnahme, der Umformung oder der Ausgabe von Meßwerten dienen.

Meßsignale stellen Meßgrößen im Signalflußweg einer Meßeinrichtung durch zugeordnete physikalische Größen gleicher oder anderer Art dar (VDI/VDE 2600).

1.3.3 Meßkette (Struktur einer elektrischen Meßeinrichtung)

Eine komplette *Meßkette* besteht aus den in Abb. 1.1 gezeigten Komponenten. Grundsätzlich besteht eine Meßeinrichtung zur elektrischen Messung elektrischer bzw. nicht-elektrischer Größen aus den Meßgeräten (Meßgliedern), die im einzelnen folgende Aufgaben erfüllen:

- Aufnehmen der Meßgröße
- Weitergeben, Anpassen und Verarbeiten des Meßsignals
- Ausgeben des Meßwertes.

Nach dem Geräteplan (Abb. 1.1) sind die hierfür notwendigen Meßglieder in einer Meßkette zusammengeschaltet (VDI/VDE 2600, Bl. 3). Der Aufnehmer wandelt die Meßgröße entweder direkt oder über andere physikalische Größen in ein elektrisches Meßsignal y_1 um. Die *Anpasser* enthalten Meßgeräte, die zwischen Aufnehmer und Ausgeber in der Meßkette liegen. Dazu gehören vor allem *Meßverstärker* und *elektronische Rechengерäte*. Der Ausgeber gibt die Meßwerte z analog oder digital entweder direkt (d. h. sofort sichtbar und verständlich) über eine Anzeige, Schreiber bzw. Zähler oder aber indirekt,

d. h. nicht ohne Spezialvorrichtung lesbar, zur weiteren Informationsverarbeitung aus. Die Hauptaufgabe des Hilfsgerätes ist es, die von den Meßgeräten eventuell benötigte *Hilfsenergie* zu liefern.

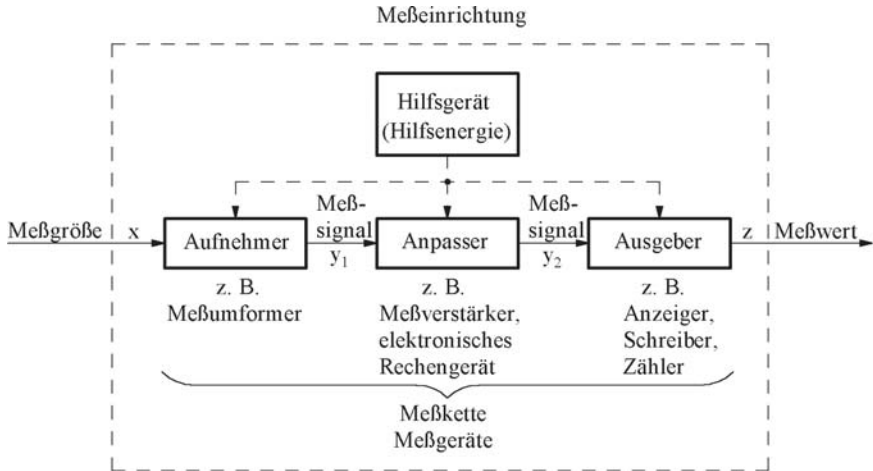


Abb. 1.1. Struktur einer elektrischen Meßeinrichtung nach VDI/VDE 2600

1.4 Vorschriften und Normen

In Tabelle 1.1 werden die wichtigsten nationalen und internationalen Institutionen angeführt, die zur Normbildung und zur Definition von Vorschriften im Bereich der Elektrischen Meßtechnik beitragen. In Tabelle 1.2 sind die wichtigsten in der Elektrischen Meßtechnik zu beachtenden Vorschriften und Normen in tabellarischer Form zusammengefaßt.

1.5 Klassifizierung von Meßmethoden

Eine Klassifizierung von Meßmethoden kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen. Die wichtigsten Klassifizierungsmethoden werden in den folgenden vier Abschnitten kurz beschrieben.

1.5.1 Ausschlagmethode - Kompensationsmethode

Bei der *Ausschlagmethode* wird die Meßgröße direkt oder über Zwischengrößen in einen möglichst proportionalen Ausschlag umgewandelt, z. B. die Winkelstellung eines Meßgerätezeigers. Als Sonderfall kann dieser Ausschlag auch