

Thomas Mühl

Einführung in die elektrische Messtechnik

Thomas Mühl

Einführung in die elektrische Messtechnik

Grundlagen, Messverfahren, Geräte

3., neu bearbeitete Auflage

Mit 190 Abbildungen, 12 Tabellen und
54 Beispielen sowie 15 Aufgaben mit Lösungen

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Professor Dr.-Ing. Thomas Mühl lehrt Elektrische Messtechnik und Prozessdatenverarbeitung an der
FH Aachen.

1. Auflage 2001
2. Auflage 2006
- 3., neu bearbeitete Auflage 2008
korrigierter Nachdruck 2012

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012

Lektorat: Reinhard Dapper | Andrea Broßler

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Druck und buchbinderische Verarbeitung: STRAUSS GMBH, Mörlenbach
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier
Printed in Germany

ISBN 978-3-8351-0189-0

Vorwort zur 3. Auflage

Für die dritte Auflage wurde der Buchinhalt der aktuellen Entwicklung der elektrischen Messtechnik angepasst und in einigen Kapiteln deutlich erweitert, um dem Trend in Richtung digitale Messverfahren Rechnung zu tragen. Dies betrifft vor allem die digitalen Leistungsanalytoren, Impedanzmessgeräte und die Fast-Fourier-Transformation zur Spektrumanalyse.

Zusätzlich wurden zum Abschluss der Kapitel 2, 3, 5, 6, 7, 9 und 10 typische Aufgaben angefügt, zu denen am Ende des Buches, nach dem Literaturverzeichnis, Musterlösungen angegeben sind. Dies soll zum einen die praxisnahe Anwendung wiedergeben und zum anderen eine Lernkontrolle des Dargestellten ermöglichen.

Danken möchte ich allen, die mich bei der Überarbeitung unterstützt haben, den interessierten Lesern für ihre mitgeteilten Anregungen und Herrn Martin Feuchte vom Teubner Verlag für die sehr gute Kooperation.

Aachen, im September 2007

Thomas Mühl

Vorwort zur 1. Auflage

Das vorliegende Buch „Einführung in die elektrische Messtechnik“ behandelt die Grundlagen, Verfahrensweisen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik. Nach einer Einführung in grundlegende Begriffe und einer allgemeinen Beschreibung der Eigenschaften elektrischer Messgeräte werden die analogen und digitalen Messprinzipien und Verfahren zur Messung der wichtigsten elektrischen Größen erläutert. Im Vordergrund steht dabei die praxisnahe Anwendung, die aber voraussetzt, dass die wichtigsten Messverfahren verstanden werden und so eine geeignete Auswahl und der richtige Einsatz erfolgen kann. Erst die Kenntnis der Zusammenhänge der Einstellparameter und die Abschätzung möglicher Rückwirkung auf die Messgröße ermöglicht sinnvolle Messungen, und vermeidet so manche, aufwendige Messreihe, die kein wertbares Ergebnis liefert.

Die in diesem Buch behandelten Themen und Problemstellungen decken die wesentlichen Inhalte einer Vorlesung über die Grundlagen der elektrischen Messtechnik ab, wie sie beispielsweise Studenten im Grundstudium der Elektrotechnik als Einzelfach oder im Rahmen der Grundgebiete der Elektrotechnik hören. Darüber hinaus werden Studenten anderer Fachrichtungen und praktisch tätige Naturwissenschaftler oder Ingenieure angesprochen, die sich in die Aufgaben und Lösungsmöglichkeiten der elektrischen Messtechnik einarbeiten und praktische Anregungen erhalten wollen.

Das Buch ist in zehn Kapitel unterteilt. Die ersten vier grundlegenden behandeln Begriffe, Einheiten und Normale, die Darlegung der Messabweichung und Messunsicherheit sowie die allgemeinen Eigenschaften elektrischer Messgeräte, wie das statische und dynamische Verhalten, die Genauigkeitsangaben und den Aufbau elektromechanischer und digitaler Messgeräte. In den nachfolgenden sechs Kapiteln werden die Messprinzipien und Verfahren zur Messung von Strom und Spannung, Widerstand und Impedanz, Leistung und Arbeit, Zeit, Frequenz und Spektrum sowie die Oszilloskope erläutert. Durch die schnelle Entwicklung und den zunehmenden Einsatz der Digitaltechnik werden neben den analogen vor allem die digitalen Verfahren und die spezifischen Besonderheiten, Möglichkeiten und Einsatzbereiche der aktuellen Messgeräte vorgestellt.

Ich möchte hiermit allen danken, die einen Beitrag zur Entstehung dieses Buches geleistet haben. In besonderer Linie bin ich Herrn Dipl.-Ing. Wilfried Bock für sein Korrekturlesen des Manuskriptes und Anregungen zur Verbesserung zu Dank verpflichtet. Der Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Bela Kazay und meiner Frau Ruth für die Mitarbeit bei der Korrektur.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei allen an diesem Werk beteiligten Mitarbeitern des Teubner Verlags, insbesondere Herrn Dr. Jens Schlembach, der die Anregung zum Schreiben dieses Werkes gab, sowie Herrn Andreas Meißner für die Unterstützung bei der Erstellung der druckreifen Vorlage.

Aachen, im August 2001

Thomas Mühl

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Grundlagen	12
1.1	Aufgaben der Messtechnik	12
1.2	Normen und Begriffe	13
1.2.1	Normen und Vorschriften	13
1.2.2	Begriffsdefinitionen	14
1.2.3	Messtechnische Tätigkeiten	16
1.2.4	Messmethoden	17
1.3	Einheiten und Normale	19
1.3.1	Maßsysteme	19
1.3.2	Das Einheitensystem SI	20
1.3.3	Darstellung der Einheiten	23
1.3.4	Normale und Kalibrierkette	27
2	Messabweichung und Messunsicherheit	30
2.1	Arten von Messabweichungen	30
2.2	Systematische Messabweichungen	32
2.2.1	Bekannte und unbekannte systematische Abweichungen	33
2.2.2	Fortpflanzung systematischer Messabweichungen	33
2.3	Zufällige Messabweichungen	35
2.3.1	Beschreibung statistischer Größen	35
2.3.2	Stichprobe einer Messgröße	40
2.3.3	Fortpflanzung zufälliger Abweichungen	42
2.4	Messunsicherheit und vollständiges Messergebnis	46
3	Eigenschaften elektrischer Messgeräte	50
3.1	Statisches Verhalten	51
3.2	Dynamisches Verhalten	53
3.2.1	Beschreibung dynamischer Systeme	54
3.2.2	Messsystem 1. Ordnung	58
3.2.3	Messsystem 2. Ordnung	62
3.2.4	Mehrgliedrige, lineare Systeme	66
3.3	Angaben zur Genauigkeit elektrischer Messgeräte	69
3.3.1	Fehlergrenze und Grenzwerte der Messabweichungen	70
3.3.2	Angabe der Fehlergrenzen	72

4	Elektromechanische und digitale Messgeräte	74
4.1	Elektromechanische Messgeräte	74
4.1.1	Drehspulmesswerk	74
4.1.2	Dreheisenmesswerk	78
4.1.3	Elektrodynamisches Messwerk	80
4.1.4	Weitere elektromechanische Messwerke	82
4.1.5	Symbole für direkt wirkende, elektrische Messgeräte	83
4.2	Digitale Messgeräte	84
4.2.1	Abtastung und Quantisierung	85
4.2.2	Digitalvoltmeter und allgemeines digitales Messgerät	87
5	Messung von Strom und Spannung	90
5.1	Gleichstrom- und Gleichspannungsmessung	90
5.1.1	Grundsaltungen	90
5.1.2	Messbereichserweiterung	94
5.1.3	Überlastschutz	98
5.2	Wechselstrom- und Wechselspannungsmessung	102
5.2.1	Beschreibung periodisch zeitabhängiger Größen	102
5.2.2	Messgleichrichter	104
5.2.3	Effektivwertmessung	109
5.2.4	Messwandler	114
5.3	Multimeter	120
6	Messung von ohmschen Widerständen und Impedanzmessung	124
6.1	Ohmsche Widerstandsmessung	124
6.1.1	Strom- und Spannungsmessung	124
6.1.2	Verwendung einer Konstantstromquelle	129
6.1.3	Abgleich-Widerstandsmessbrücken	131
6.1.4	Ausschlag-Widerstandsmessbrücken	135
6.2	Impedanzmessung	142
6.2.1	Beschreibung realer passiver Bauelemente	142
6.2.2	Strom- und Spannungsmessung	145
6.2.3	Messung von Strom, Spannung und Phasenwinkel	147
6.2.4	Wechselspannungs-Messbrücken	153
6.2.5	Resonanzverfahren	158
6.2.6	Messungen an Verbrauchern im Wechselstromnetz	162

7	Leistungs- und Energiemessung	165
7.1	Leistungsbegriffe und Dreiphasensystem	165
7.1.1	Wirk-, Blind- und Scheinleistung	165
7.1.2	Symmetrisches Dreiphasensystem	167
7.2	Elektrodynamischer Leistungsmesser	171
7.2.1	Leistungsmessung im Gleichstromkreis	171
7.2.2	Leistungsmessung im Wechselstromkreis	173
7.2.3	Leistungsmessung im Drehstromsystem	176
7.3	Digitale Leistungsmesser	181
7.3.1	Aufbau eines digitalen Leistungsmessers	181
7.3.2	Messungen in Wechselstrom- und Drehstromsystemen	182
7.4	Elektronische Leistungsmesser	186
7.4.1	Analogmultiplizierende Leistungsmesser und TDM	186
7.4.2	Leistungsmesser mit Hall-Sensoren	188
7.5	Messung der elektrischen Energie	190
7.5.1	Induktionszähler	191
7.5.2	Elektronische Elektrizitätszähler	193
8	Oszilloskope	198
8.1	Analoges Elektronenstrahloszilloskop	198
8.1.1	Elektronenstrahlröhre	199
8.1.2	Baugruppen des Elektronenstrahloszilloskops	202
8.1.3	Analoges Speicheroszilloskop und Sampling-Oszilloskop	206
8.2	Digitaloszilloskop	208
8.2.1	Aufbau und Funktion	208
8.2.2	Spezielle Betriebsarten von Digitaloszilloskopen	214
8.3	Messanwendungen	215
8.4	Tastköpfe	219
8.4.1	Passiver Spannungs-Tastkopf	221
8.4.2	Weitere Tastköpfe	226
9	Zeit- und Frequenzmessung	230
9.1	Gatter, Speicher und Zähler	231
9.1.1	Logische Verknüpfungen und Gatter	232
9.1.2	Speicherelemente	234
9.1.3	Zähler	240
9.2	Digitale Zeitmessung	242
9.2.1	Messung eines Zeitintervalls	242
9.2.2	Messung der Periodendauer	245
9.2.3	Der Zeitsignalsender DCF 77	246

Inhaltsverzeichnis	11	
9.3	Digitale Frequenzmessung	249
9.3.1	Direkte Zählung	249
9.3.2	Umkehrverfahren	252
9.3.3	Verhältniszählverfahren	253
9.4	Universalzähler	255
9.5	Analoge Zeit- und Frequenzmessung	256
10	Spektrumanalyse	260
10.1	Grundlagen der Spektrumanalyse	260
10.1.1	Fourier-Reihe	260
10.1.2	Fourier-Transformation	263
10.1.3	Darstellung des Spektrums	265
10.2	Selektive Signalmessung	268
10.2.1	Festfrequenz-Analysatoren	268
10.2.2	Analysatoren mit abstimmbaren Filtern	270
10.3	Eigenschaften von Spektrumanalysatoren	274
10.4	Netzwerkanalyse	279
10.5	FFT-Analysatoren	280
Literaturverzeichnis	290
Lösungen zu den Aufgaben	294
Sachwortverzeichnis	306