

Messtechnik
für
Ingenieure und Praktiker

Prof. Dr.-Ing. Harald Ortwig
Prof. Dr.-Ing. Uwe J. Zimmermann, B.E.

Trierer Systemtechnik

Uwe Zimmermann
Harald Ortwig

Messtechnik

für Ingenieure
und Praktiker

2. überarbeitete Auflage

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.

Copyright Shaker Verlag 2013

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2071-7

ISSN 2190-6076

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Das vorliegende Buch ist aus dem langjährig verwendeten Umdruck zur Vorlesung „Messtechnik“ im Fachbereich Maschinenbau der Hochschule Trier entstanden. Aus der Weiterentwicklung und Diversifizierung der Studiengänge resultierte der Wunsch, den Studenten über das gewohnte Skriptmaterial hinaus eine professionelle, gut verständliche Arbeitsunterlage zur Verfügung zu stellen. Das Buch enthält in kompakter Form wesentliche Grundlagen und stellt darauf aufbauend die relevanten Messverfahren und –geräte zu mechanischen, elektrotechnischen und thermodynamischen Problemstellungen vor. Der in der Vorlesung „Messtechnik“ dargebotene Stoff wird voll umfänglich behandelt, insofern erübrigt sich eine Vorlesungsmitschrift, so dass die Inhalte konzentrierter aufgenommen werden können. Zur Übung und Vertiefung der Inhalte wird jedes Kapitel durch Aufgabenstellungen ergänzt, die das selbständige Wiederholen des Stoffes sowie die Prüfungsvorbereitung ermöglichen. Darüber hinaus eignet sich das Buch auch zur Wiederholung bzw. zum Selbststudium und richtet sich daher ganz allgemein an Hochschulstudenten der Natur- und Ingenieurwissenschaften sowie verwandter Fächer, aber auch an Praktiker im Berufsleben. Es schafft das grundlegende Verständnis sowie das Basiswissen, welches der praktisch tätige Ingenieur zur Bewältigung seiner täglich anfallenden Messaufgaben benötigt.

Trier, im April 2009

Prof. Dr.-Ing. Uwe Zimmermann, B.E.

Studium des Maschinenbau an der RWTH Aachen und in den USA, Promotion am Institut für Regelungstechnik. Industrietätigkeit im Bereich Regelung schnelllaufender Großdieselmotoren. Seit 1995 Professor für Mess- und Regelungstechnik an der FH Trier.

Prof. Dr.-Ing. Harald Ortwig

Studium des Maschinenbau an der RWTH Aachen, Promotion am Institut für hydraulische und pneumatische Antriebe und Steuerungen. Industrietätigkeit im Bereich Mobilhydraulik. Seit 1993 Professor für Fluidtechnik (Hydraulik und Pneumatik) an der FH Trier.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe	1
2	Messfehler	7
2.1	Fehlerquellen und Fehlerarten	7
2.2	Linearitätsfehler von Kennlinien	8
2.3	Garantiefehlergrenzen von Messgeräten	10
2.4	Rechnerische Erfassung der zufälligen Fehler	11
2.5	Fortpflanzung von Fehlern und Fehlergrenzen	16
2.5.1	Fortpflanzung von systematischen Fehlern	16
2.5.2	Fortpflanzung für Rechengrößen der zufälligen Fehler	16
2.5.3	Fortpflanzung von Fehlergrenzen	17
2.6	Übungsaufgaben	21
3	Messung elektrischer Größen	25
3.1	Strom- und Spannungsmessung mit Drehspul- und Dreheisenmessgerät	25
3.1.1	Drehspulmessgerät	25
3.1.2	Dreheisenmessgerät	30
3.1.3	Skalen- und Geräteaufschriften	32
3.2	Spannungsmessung mit einem Kompensator	33
3.2.1	Der Kompensator nach Poggendorf	33
3.2.2	Der Kompensationsschreiber	34
3.3	Spannungsmessung mit dem Elektronenstrahl-Oszilloskop	35
3.4	Messung ohmscher Widerstände	44
3.4.1	Widerstandsbestimmung durch Messung von Strom und Spannung	44
3.4.2	Widerstandsmessung mit der Wheatstoneschen Brücke	46
3.5	Messungen mit dem Universalzähler	48
3.5.1	Einführung	48
3.5.2	Funktionsbausteine eines Universalzählers	49
3.5.2.1	Zähler mit Anzeige	49

3.5.2.2	Eingangstrigger	49
3.5.2.3	Tor und Torsteuerung	50
3.5.2.4	Zeitbasis-Oszillator	50
3.5.2.5	Periodendauer-Vervielfacher, Frequenzteiler	50
3.5.2.6	Blockschaltbilder der wichtigsten Messschaltungen	51
3.5.2.7	Ereigniszählung	51
3.5.2.8	Frequenzmessung	51
3.5.2.9	Zeitintervall-Messung	52
3.5.2.10	Messung der mittleren Periodendauer	53
3.6	Übungsaufgaben	55
4	Temperaturmessung	69
4.1	Mechanische Berührungsthermometer	71
4.1.1	Flüssigkeits-Glasthermometer	71
4.1.2	Flüssigkeits-Federthermometer	72
4.1.3	Dampfdruck-Federthermometer	73
4.1.4	Metallausdehnungs-Thermometer	74
4.1.4.1	Stabausdehnungsthermometer	74
4.1.4.2	Bimetallthermometer	75
4.2	Elektrische Berührungsthermometer	76
4.2.1	Thermoelemente	76
4.2.1.1	Seebeck-Effekt	76
4.2.1.2	Messschaltungen für Thermoelemente	77
4.2.1.3	Eigenschaften der wichtigsten Thermopaare	80
4.2.2	Widerstandsthermometer	86
4.2.2.1	Metallische Widerstandsthermometer	86
4.2.2.2	Halbleiter-Messwiderstände	88
4.2.2.3	Messschaltungen für Widerstandsthermometer	89
4.2.3	Ausführungsformen elektrischer Berührungsthermometer	91
4.2.4	Zusammenfassung	93
4.3	Strahlungsthermometer und Infrarotthermografie	94
4.4	Physikochemische Messverfahren	97
4.4.1	Segerkegel	97
4.4.2	Temperaturmessfarben	98
4.5	Übungsaufgaben	99

5	Messung mechanischer Größen	105
5.1	Messungen mit Dehnungsmessstreifen	105
5.1.1	Dehnungsmessstreifen	105
5.1.2	Die Abhängigkeit des Widerstandes metallischer Leiter von der Dehnung	109
5.1.3	Der Einfluss der Temperatur auf die Widerstandsänderung von metallischen DMS	111
5.1.4	Messschaltungen	112
5.1.4.1	Die Viertelbrückenschaltung	114
5.1.4.2	Die Halbbrückenschaltung	116
5.1.4.3	Die Zweiviertelbrückenschaltung	117
5.1.4.4	Die Vollbrückenschaltung	118
5.1.5	Messverstärker	119
5.2	Kraftmessung	121
5.2.1	Kraftaufnehmer mit Federn	122
5.2.1.1	Kraftaufnehmer mit DMS als Verformungsfühler	122
5.2.1.2	Kraftaufnehmer mit Wegaufnehmern als Verformungsfühler	122
5.2.2	Piezoelektrische Kraftaufnehmer	123
5.2.3	Hydraulische Kraftaufnehmer	126
5.3	Druckmessung	127
5.3.1	Einführung	127
5.3.2	Druckmessgeräte	128
5.3.2.1	Kolbendruckmessgeräte	128
5.3.2.2	Flüssigkeitsdruckmessgeräte	130
5.3.2.3	Druckwagen mit Sperrflüssigkeit	133
5.3.2.4	Federmanometer	134
5.3.2.5	Druckaufnehmer mit elektrischem Ausgangssignal	136
5.4	Weg- und Winkelmessung	137
5.4.1	Wegmessung mit analogen Wegaufnehmern	138
5.4.1.1	Potentiometer-Wegaufnehmer	138
5.4.1.2	Differentialdrossel als induktiver Wegaufnehmer	141
5.4.1.3	Induktiver Wegaufnehmer mit Schwingkreis	143
5.4.2	Wegmessung mit digitalen Messsystemen	144
5.4.2.1	Messeinrichtung mit inkrementalem Wegaufnehmer	144
5.4.2.2	Messeinrichtung mit codiertem Wegaufnehmer	146
5.5	Drehzahlmessung	148
5.5.1	Messeinrichtungen mit berührenden Drehzahlaufnehmern	148
5.5.1.1	Drehzahlaufnehmer mit Wechselspannungsausgang	148
5.5.1.2	Drehzahlaufnehmer mit Gleichspannungsausgang	150

5.5.1.3	Wirbelstrom-Drehzahlmesser	150
5.5.2	Messeinrichtungen mit berührungslosen Drehzahlaufnehmern	151
5.5.2.1	Photoelektrischer Impulsgeber	151
5.5.2.2	HF-Drehzahlaufnehmer	151
5.5.2.3	Nachschatgeräte	152
5.5.3	Stroboskop	153
5.6	Übungsaufgaben	156