
Das Ingenieurwissen: Messtechnik

Hans-Rolf Tränkler • Gerhard Fischerauer

Das Ingenieurwissen: Messtechnik

Hans-Rolf Tränkle
Universität der Bundeswehr München
München, Deutschland

Gerhard Fischerauer
Universität Bayreuth
Bayreuth, Deutschland

ISBN 978-3-662-44029-2
DOI 10.1007/978-3-662-44030-8

ISBN 978-3-662-44030-8 (eBook)

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

Springer Vieweg

Das vorliegende Buch ist Teil des ursprünglich erschienenen Werks „HÜTTE – Das Ingenieurwissen“, 34. Auflage.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, 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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Die HÜTTE Das Ingenieurwissen ist ein Kompendium und Nachschlagewerk für unterschiedliche Aufgabenstellungen und Verwendungen. Sie enthält in einem Band mit 17 Kapiteln alle Grundlagen des Ingenieurwissens:

- Mathematisch-naturwissenschaftliche Grundlagen
- Technologische Grundlagen
- Grundlagen für Produkte und Dienstleistungen
- Ökonomisch-rechtliche Grundlagen

Je nach ihrer Spezialisierung benötigen Ingenieure im Studium und für ihre beruflichen Aufgaben nicht alle Fachgebiete zur gleichen Zeit und in gleicher Tiefe. Beispielsweise werden Studierende der Eingangssemester, Wirtschaftsingenieure oder Mechatroniker in einer jeweils eigenen Auswahl von Kapiteln nachschlagen. Die elektronische Version der Hütte lässt das Herunterladen einzelner Kapitel bereits seit einiger Zeit zu und es wird davon in beträchtlichem Umfang Gebrauch gemacht.

Als Herausgeber begrüßen wir die Initiative des Verlages, nunmehr Einzelkapitel in Buchform anzubieten und so auf den Bedarf einzugehen. Das klassische Angebot der Gesamt-Hütte wird davon nicht betroffen sein und weiterhin bestehen bleiben. Wir wünschen uns, dass die Einzelbände als individuell wählbare Bestandteile des Ingenieurwissens ein eigenständiges, nützliches Angebot werden.

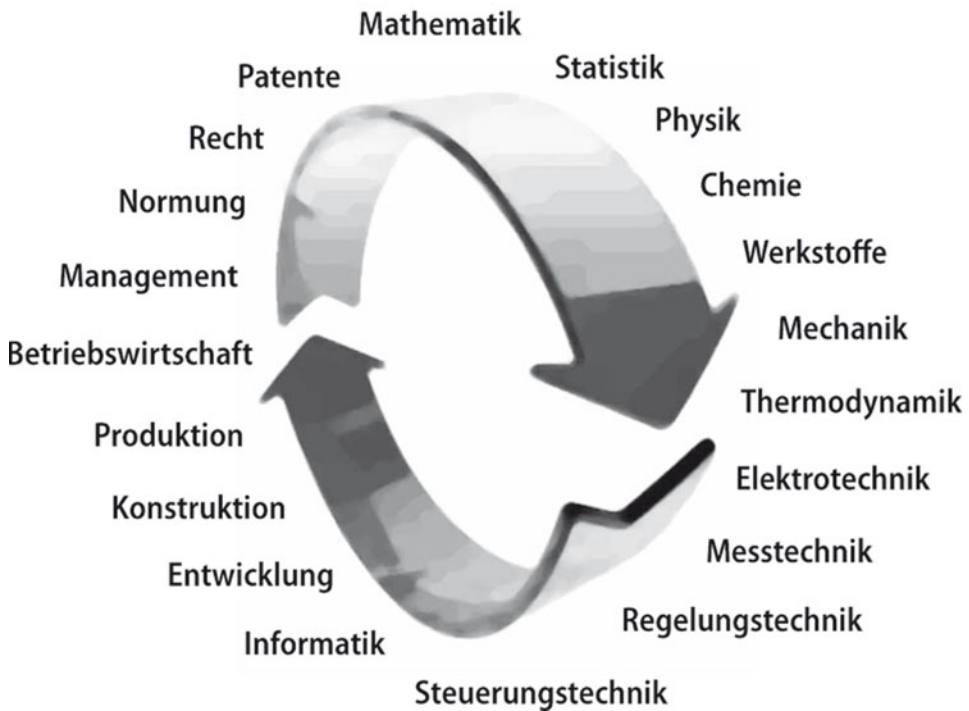
Unser herzlicher Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen für ihre Beiträge und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Springer-Verlages für die sachkundige redaktionelle Betreuung sowie dem Verlag für die vorzügliche Ausstattung der Bände.

Berlin, August 2013

H. Czichos, M. Hennecke

Das vorliegende Buch ist dem Standardwerk *HÜTTE Das Ingenieurwissen 34. Auflage* entnommen. Es will einen erweiterten Leserkreis von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern ansprechen, der nur einen Teil des gesamten Werkes für seine tägliche Arbeit braucht. Das Gesamtwerk ist im sog. Wissenskreis dargestellt.

Das Ingenieurwissen Grundlagen



Messtechnik

H.-R. Tränkle, G. Fischerauer

1	Grundlagen der Messtechnik	1
1.1	Übersicht	1
	1.1.1 Messsysteme und Messketten – 1.1.2 Anwendungsgebiete und Aufgabenstellungen der Messtechnik	
1.2	Übertragungseigenschaften von Messgliedern	2
	1.2.1 Statische Kennlinien von Messgliedern – 1.2.2 Dynamische Übertragungseigenschaften von Messgliedern – 1.2.3 Testfunktionen und Übergangsfunktionen für Übertragungsglieder – 1.2.4 Das Frequenzverhalten des Übertragungsgliedes 1. Ordnung – 1.2.5 Das Frequenzverhalten des Übertragungsgliedes 2. Ordnung – 1.2.6 Sprungantwort eines Übertragungsgliedes 2. Ordnung – 1.2.7 Frequenzgang eines Übertragungsgliedes 2. Ordnung – 1.2.8 Kenngrößen für Messglieder höherer Ordnung	
1.3	Messfehler	9
	1.3.1 Zufällige und systematische Fehler – 1.3.2 Definition von Fehlern, Fehlerkurven und Fehleranteilen – 1.3.3 Linearitätsfehler und zulässige Fehlergrenzen – 1.3.4 Einflussgrößen und Einflusseffekt – 1.3.5 Diskrete Verteilungsfunktionen zufälliger Messwerte – 1.3.6 Die Normalverteilung – 1.3.7 Gauß'sche Fehlerwahrscheinlichkeit – 1.3.8 Wahrscheinlichkeitspapier – 1.3.9 Fehlerfortpflanzung zufälliger Fehler – 1.3.10 Fehlerfortpflanzung systematischer Fehler	
2	Strukturen der Messtechnik	15
2.1	Messsignalverarbeitung durch strukturelle Maßnahmen	15
	2.1.1 Die Kettenstruktur – 2.1.2 Die Parallelstruktur (Differenzprinzip) – 2.1.3 Die Kreisstruktur	
2.2	Das Modulationsprinzip	18
2.3	Struktur eines digitalen Instrumentierungssystems	19
	2.3.1 Erhöhung des nutzbaren Informationsgehalts – 2.3.2 Struktur von Mikroelektroniksystemen mit dezentraler Intelligenz	
3	Messgrößenaufnehmer (Sensoren)	21
3.1	Sensoren und deren Umfeld	21
	3.1.1 Aufgabe der Sensoren – 3.1.2 Messeffekt und Einflusseffekt – 3.1.3 Anforderungen an Sensoren – 3.1.4 Signalform der Sensorsignale	
3.2	Sensoren für geometrische und kinematische Größen	22
	3.2.1 Resistive Weg- und Winkelaufnehmer – 3.2.2 Induktive Weg- und Längenaufnehmer – 3.2.3 Kapazitive Aufnehmer für Weg und Füllstand – 3.2.4 Magnetische Aufnehmer – 3.2.5 Codierte Weg- und Winkelaufnehmer – 3.2.6 Inkrementale Aufnehmer – 3.2.7 Laser-Interferometer – 3.2.8 Drehzahlaufnehmer – 3.2.9 Beschleunigungsaufnehmer	
3.3	Sensoren für mechanische Beanspruchungen	31
	3.3.1 Dehnungsmessung mit Dehnungsmessstreifen – 3.3.2 Kraftmessung mit Dehnungsmessstreifen – 3.3.3 Druckmessung mit Dehnungsmessstreifen – 3.3.4 Drehmomentmessung mit Dehnungsmessstreifen – 3.3.5 Messung von Kräften über die Auslenkung von Federkörpern – 3.3.6 Messung von Drücken über die Auslenkung von Federkörpern – 3.3.7 Kraftmessung über Schwingsaiten – 3.3.8 Waage mit elektrodynamischer Kraftkompensation – 3.3.9 Piezoelektrische Kraft- und Druckaufnehmer	
3.4	Sensoren für strömungstechnische Kenngrößen	36
	3.4.1 Durchflussmessung nach dem Wirkdruckverfahren – 3.4.2 Schwabekörper-Durchflussmessung – 3.4.3 Durchflussmessung über magnetische Induktion – 3.4.4 Ultraschall-Durchflussmessung – 3.4.5 Turbinen-Durchflussmesser (mittelbare Volumenzähler mit Messflügeln) – 3.4.6 Verdrängungszähler (unmittelbare Volumenzähler)	
3.5	Sensoren zur Temperaturmessung	39
	3.5.1 Platin-Widerstandsthermometer – 3.5.2 Andere Widerstandsthermometer – 3.5.3 Thermoelemente als Temperaturlaufnehmer – 3.5.4 Strahlungsthermometer (Pyrometer)	

3.6	Mikrosensorik	44
	3.6.1 Herstellungstechnologien – 3.6.2 Mikrosensoren für mechanische Größen – 3.6.3 Mikrosensoren für Temperatur – 3.6.4 Mikrosensoren für (bio)chemische Größen – 3.6.5 Mikrosensoren für magnetische Größen	
3.7	Sensorspezifische Messsignalverarbeitung	47
	3.7.1 Analoge Messsignalverarbeitung – 3.7.2 Inkrementale Messsignalverarbeitung – 3.7.3 Digitale Grundverknüpfungen und Grundfunktionen – 3.7.4 Physikalische Modellfunktionen für einen Sensor – 3.7.5 Skalierung und Linearisierung von Sensorkennlinien durch Interpolation – 3.7.6 Interpolation von Sensorkennlinien mit kubischen Splines – 3.7.7 Ausgleichskriterien zur Approximation von Sensorkennlinien – 3.7.8 Korrektur von Einflusseffekten auf Sensorkennlinien – 3.7.9 Dynamische Korrektur von Sensoren	
4	Messschaltungen und Messverstärker	53
4.1	Signalumformung mit verstärkerlosen Messschaltungen	53
	4.1.1 Strom-Spannungs-Umformung mit Messwiderstand – 4.1.2 Spannungsteiler und Stromteiler – 4.1.3 Direktanzeigende Widerstandsmessung	
4.2	Messbrücken und Kompensatoren	56
	4.2.1 Qualitative Behandlung der Prinzipschaltungen – 4.2.2 Spannungs- und Stromkompensation – 4.2.3 Messbrücken im Ausschlagverfahren (Teilkompensation) – 4.2.4 Wheatstone-Brücke im Abgleichverfahren – 4.2.5 Wechselstrombrücken	
4.3	Grundschaltungen von Messverstärkern	60
	4.3.1 Operationsverstärker – 4.3.2 Anwendung von Operationsverstärkern als reine Nullverstärker – 4.3.3 Das Prinzip der Gegenkopplung am Beispiel des reinen Spannungsverstärkers – 4.3.4 Die vier Grundschaltungen gegengekoppelter Messverstärker	
4.4	Ausgewählte Messverstärker-Schaltungen	63
	4.4.1 Vom Stromverstärker mit Spannungsausgang zum Invertierer – 4.4.2 Aktive Brückenschaltung – 4.4.3 Addier- und Subtrahierverstärker – 4.4.4 Der Elektrometervverstärker (Instrumentation Amplifier) – 4.4.5 Präzisionsgleichrichtung – 4.4.6 Aktive Filter – 4.4.7 Ladungsverstärker – 4.4.8 Integrationsverstärker für Spannungen	
5	Analoge Messtechnik	67
5.1	Analoge Messwerke	67
	5.1.1 Prinzip des linearen Drehspulmesswerks – 5.1.2 Statische Eigenschaften des linearen Drehspulmesswerks	
5.2	Funktionsbildung und Verknüpfung mit Messwerken	69
	5.2.1 Kernmagnetmesswerk mit radialem Sinusfeld – 5.2.2 Quotientenbestimmung mit Kreuzspulmesswerken – 5.2.3 Bildung von linearen Mittelwerten und Extremwerten – 5.2.4 Bildung von quadratischen Mittelwerten – 5.2.5 Multiplikation mit elektrodynamischen Messwerken – 5.2.6 Integralwertbestimmung mit Induktionszählern	
5.3	Prinzip und Anwendung des Elektronenstrahloszilloskops	75
	5.3.1 Elektronenstrahlröhre, Ablenkempfindlichkeit – 5.3.2 Darstellung des zeitlichen Verlaufs periodischer Messsignale – 5.3.3 Blockschaltbild eines Oszilloskops in Standardausführung – 5.3.4 Anwendung eines Oszilloskops im x,y-Betrieb – 5.3.5 Frequenzkompensierter Eingangsteiler	
6	Digitale Messtechnik	79
6.1	Quantisierung und digitale Signaldarstellung	79
	6.1.1 Informationsverlust durch Quantisierung – 6.1.2 Der relative Quantisierungsfehler	
6.2	Abtasttheorem und Abtastfehler	80
	6.2.1 Das Shannon'sche Abtasttheorem – 6.2.2 Frequenzgang bei Extrapolation nullter Ordnung – 6.2.3 Abtastfehler eines Haltekreises	
6.3	Digitale Zeit- und Frequenzmessung	82
	6.3.1 Prinzip der digitalen Zeit- und Frequenzmessung – 6.3.2 Der Quarzoszillator – 6.3.3 Digitale Zeitmessung – 6.3.4 Digitale Frequenzmessung – 6.3.5 Auflösung und Messzeit bei der Periodendauer- bzw. Frequenzmessung – 6.3.6 Reziprokwertbildung und Multiperiodendauerermessung	

6.4	Analog-Digital-Umsetzung über Zeit oder Frequenz als Zwischengrößen	86
	6.4.1 Charge-balancing-Umsetzer – 6.4.2 Dual-slope-Umsetzer – 6.4.3 Integrierende Filterung bei integrierenden Umsetzern	
6.5	Analog-Digital-Umsetzung nach dem Kompensationsprinzip	89
	6.5.1 Prinzip – 6.5.2 Digital-Analog-Umsetzer mit bewerteten Leitwerten – 6.5.3 Digital-Analog-Umsetzer mit Widerstandskettenleiter – 6.5.4 Nachlaufumsetzer mit Zweirichtungszähler – 6.5.5 Analog-Digital-Umsetzer mit sukzessiver Approximation	
6.6	Schnelle Analog-Digital-Umsetzung und Transientenspeicherung	93
	6.6.1 Parallele Analog-Digital-Umsetzer (Flash-Converter) – 6.6.2 Transientenspeicherung	
	Literatur	95