H.-R. Tränkler · G. Fischerauer

Das Ingenieurwissen Messtechnik

Ingenieurwissen

Springer Vieweg

Das Ingenieurwissen: Messtechnik

Hans-Rolf Tränkler • Gerhard Fischerauer

Das Ingenieurwissen: Messtechnik

Springer Vieweg

Hans-Rolf Tränkler
Universität der Bundeswehr München
München, Deutschland

Gerhard Fischerauer
Universität Bayreuth
Bayreuth, Deutschland

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

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.

Messtechnik

H.-R. Tränkler, 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 Schwebekörper-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 Temperaturaufnehmer – 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 Elektrometerverstärker (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 Multiperiodendauermessung

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

Messtechnik

H.-R. Tränkler
G. Fischerauer

1 Grundlagen der Messtechnik

1.1 Übersicht

1.1.1 Messsysteme und Messketten

Die Messtechnik hat die Aufgabe, eindimensionale Messgrößen und mehrdimensionale Messvektoren technischer Prozesse aufzunehmen, die erhaltenen Messsignale umzuformen und umzusetzen (Messwerterfassung) sowie die erhaltenen Messwerte so zu verarbeiten (Messwertverarbeitung), dass das gewünschte Messergebnis (die Zielgröße) gewonnen wird.

In Messeinrichtungen oder in Messsystemen (Bild 1–1) formen zunächst Aufnehmer (Sensoren) die im Allgemeinen nichtelektrische Messgröße in ein elektrisches Messsignal um.

Dieses wird in der Regel mit geeigneten Messschaltungen, Messverstärkern und analogen Rechengliedern so umgeformt, dass ein normiertes analoges Messsignal gewonnen wird (Messumformer zur Signalanpassung). Es schließt sich ein Analog-Digital-Umsetzer an, der das normierte analoge in ein digitales Messsignal umsetzt. Nach einer Messwertverarbeitung liegen die gesuchten Informationen vor. Sie können analog oder digital ausgegeben werden.

In Messeinrichtungen und Messsystemen spielen lineare Umformungen und Umsetzungen von Messsignalen eine wesentliche Rolle. Wegen nichtidealer Messglieder (besonders unter den Sensoren) sind die Messsignale häufig verfälscht. In solchen Fällen ist eine korrigierende Signalverarbeitung erforderlich; ebenso wie Messsignalverarbeitung bei einer Reihe von Messaufgaben erst zu den interessierenden Zielgrößen führt (Intelligente Sensoren und Messsysteme).

1.1.2 Anwendungsgebiete und Aufgabenstellungen der Messtechnik

Die verschiedenen Anwendungsgebiete der Messtechnik können zum Teil im Rahmen von Automatisierungssystemen gesehen werden. Bei einer Vielzahl von Anwendungen ist jedoch der Mensch der Empfänger der Information.

Die Anwendungsgebiete der Messtechnik lassen sich in drei Gruppen unterteilen, nämlich in

– Mess- und Prüfprozesse in Forschung und Entwicklungslabors, im Prüffeld und bei Anlagenerprobungen
– Industrielle Großprozesse zur Herstellung und Verteilung von Fließ- und Stückgut und von Energie

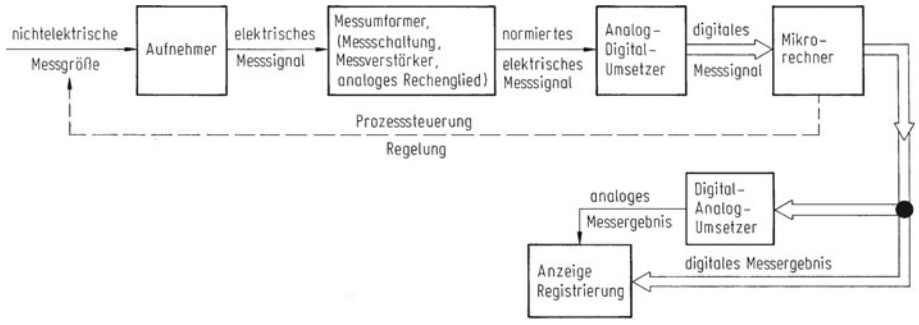

Bild 1–1. Messglieder einer Messkette in einem Messsystem

Hans-Rolf Tränkler, G. Fischerauer, *Das Ingenieurwissen: Messtechnik,*
DOI 10.1007/978-3-662-44030-8_1, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

– Dezentrale Einzelprozesse, z. B. der Gebäudetechnik, Fahrzeugtechnik oder der privaten Haushalte.

Typische Aufgabenstellungen sind:

– Sicherstellung der Genauigkeit (Kalibrierung)
– Verrechnung (Energie, Masse, Stückzahl)
– Prüfung (z. B. Lehrung)
– Qualitätssicherung (z. B. Materialprüfung)
– Steuerung und/oder Regelung
– Optimierung
– Überwachung (z. B. Schadensfrüherkennung)
– Meldung und/oder Abschaltung (Schutzsystem)
– Mustererkennung (Gestalt, Oberfläche, Geräusch, z. B. für Handhabungs- und Montagezwecke).

1.2 Übertragungseigenschaften von Messgliedern

Für die Beurteilung einer aus mehreren Messgliedern aufgebauten Messeinrichtung sind verschiedene Eigenschaften von Bedeutung. Dazu zählen die statischen Übertragungseigenschaften (z. B. die Genauigkeit), die dynamischen Übertragungseigenschaften (z. B. die Einstellzeit), die Zuverlässigkeit (z. B. die Ausfallrate) und nicht zuletzt die Wirtschaftlichkeit und Wartbarkeit einer Messeinrichtung.

1.2.1 Statische Kennlinien von Messgliedern

Der Zusammenhang zwischen der stationären Ausgangsgröße y und der Eingangsgröße x eines Messgliedes bzw. seine graphische Darstellung wird als *statische Kennlinie* bezeichnet (Bild 1-2).
Der *Messbereich* geht hier von x_0 bis $x_0+\Delta x$. Die Differenz zwischen Messbereichsende $x_0+\Delta x$ und Messbereichsanfang x_0 ist die *Eingangsspanne* Δx. Die zugeordneten Ausgangsgrößen y_0 und $y_0+\Delta y$ begrenzen den Ausgangsbereich mit der Ausgangsspanne Δy.
Dem *linearen Anteil* der Kennlinie (gestrichelt) ist i. Allg. ein unerwünschter *nichtlinearer Anteil* $y_N(x)$ überlagert. Die *Kennlinienfunktion* $y(x)$ lässt sich darstellen durch

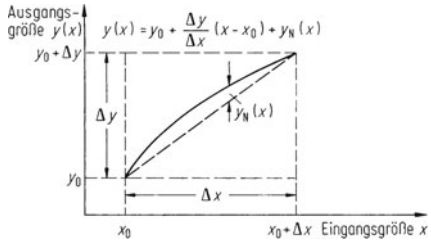

Bild 1-2. Kennlinie eines Messgliedes

$$y(x) = \underbrace{y_0 + \frac{\Delta y}{\Delta x}(x - x_0)}_{\text{linearer Anteil}} + y_N(x) \,.$$

Die *Empfindlichkeit* $E(x)$ von nichtlinearen Messgliedern ist nicht konstant. Sie ist identisch mit der Steigung der Kennlinie im betrachteten Arbeitspunkt $(x, y(x))$:

$$E(x) = \frac{\mathrm{d}y(x)}{\mathrm{d}x} = \frac{\Delta y}{\Delta x} + \frac{\mathrm{d}y_N(x)}{\mathrm{d}x} \,.$$

Bei linearen Messgliedern, deren Kennlinie durch den Ursprung des Koordinatensystems geht $(x_0 = 0, y_0 = 0)$, berechnen sich Kennlinienfunktion und Empfindlichkeit zu

$$y(x) = \frac{\Delta y}{\Delta x} x \,,$$
$$E(x) = \frac{\mathrm{d}y(x)}{\mathrm{d}x} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \text{const} \,.$$

Eine näherungsweise konstante Empfindlichkeit haben z. B. anzeigende Drehspulinstrumente.

1.2.2 Dynamische Übertragungseigenschaften von Messgliedern

Die Ausgangssignale von Messgliedern folgen Änderungen des Eingangssignals i. Allg. nur mit Verzögerungen. Gewöhnlich lassen sich dann zur Beschreibung der dynamischen Übertragungseigenschaften bestimmte Systemstrukturen und bestimmte Kenngrößen angeben. Besonders häufig treten lineare verzögernde Messglieder 1. und 2. Ordnung auf, die durch eine bzw. durch zwei Kenngrößen (Parameter) im Zeit- und/oder Frequenzbereich charakterisiert werden. Zuweilen besteht die Notwendigkeit, auch Messglieder höherer Ordnung durch geeignete Kenngrößen zu beschreiben. Schließlich tritt nichtlineares Verhalten bei Messgliedern auf, wenn Signale Sättigungs- oder Begrenzungserscheinungen aufweisen.