

F. H. Lange

Methoden der Meßstochastik

REIHE WISSENSCHAFT

Die REIHE WISSENSCHAFT ist die wissenschaftliche Handbibliothek des Naturwissenschaftlers und Ingenieurs und des Studenten der mathematischen, naturwissenschaftlichen und technischen Fächer. Sie informiert in zusammenfassenden Darstellungen über den aktuellen Forschungsstand in den exakten Wissenschaften und erschließt dem Spezialisten den Zugang zu den Nachbardisziplinen.

F. H. Lange

Methoden der Meßstochastik

Vieweg · Braunschweig

Prof. Dr. Ing. habil. F. H. Lange

Rostock

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Lange, Franz Heinrich:

Methoden der Messstochastik. — 1. Aufl. —

Braunschweig: Vieweg, 1978.

(Reihe Wissenschaft)

ISBN 978-3-528-06843-1

ISBN 978-3-322-85950-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-85950-1

Erschienen im Akademie-Verlag, 108 Berlin, Leipziger Straße 3—4

© Akademie-Verlag Berlin 1978

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1978

Lizenzausgabe für Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig,
mit Genehmigung des Akademie-Verlages, DDR-Berlin

ISBN-13: 978-3-528-06843-1

Vorwort

Bücher über die Meßtechnik behandeln meist die Meßgeräte und ihre technischen Anwendungen. Sie gehen von der physikalischen Betrachtungsweise aus, vom „physikalischen Aspekt“ der Meßtechnik. Inzwischen hat sich unter dem Einfluß der Nachrichten- und der Regelungstechnik als zweite Betrachtungsweise der „informatiorische Aspekt“ als nützlich erwiesen. Er betrifft die Meßtheorie und hat die Zielsetzung, die gemeinsamen Gesichtspunkte der Meßwert-Gewinnung, -Übertragung und -Verarbeitung in multivalenter Form zusammenzufassen. Hierdurch kann man Methoden und Erfahrungen eines Arbeitsgebietes leichter auf ein anderes übertragen.

Den Grundstein jeder Meß-Theorie bildet die klassische Meßfehler-Theorie statischer Messungen. Daneben hat sich infolge der zunehmenden Automatisierungstechnik die Meßdynamik (WOSCHNI [20]) entwickelt, die zeitvariable Meßgrößen betrachtet. Eine Weiterentwicklung ergab sich bei der Untersuchung der Einflüsse von Störungen, ebenfalls unter Ausnutzung der Erfahrungen der Nachrichtentechnik. Dazu gehört die Korrelations-Analyse ([10]). So wurde allmählich ein Arbeitsgebiet der Meßtheorie ausgebaut, das am besten mit dem Begriff „Meß-Informationen-Theorie“ bezeichnet werden kann. Es bedient sich der Meßinformationssysteme (KRAUS, WOSCHNI [9]).

Es ist das Anliegen des vorliegenden Buches, unter dem Begriff der Meßstochastik die methodischen Grundgedanken der Meßtheorie zusammenzufassen, die nicht determinierte Meßgrößen als Nutz- und als Störsignale betreffen, sogenannte stochastische Prozesse.

Sie sind so mannigfaltig, daß eine systematische Zusammenfassung lohnend erschien. Die Meß-Informationstheorie geht weit über die SHANNONSche Informationstheorie hinaus, die sich speziell mit der Optimierung der Informationsübertragung und der Informations-Speicherung beschäftigt. Die Meß-Informationstheorie berücksichtigt vollständig die Amplituden-Information der Meßereignisse, während die SHANNONSche Theorie vorzugsweise die Wahrscheinlichkeits-Information zur Bildung von Kenngrößen ausnutzt. Die Grundlagen bieten die mathematische Statistik und Stochastik einschließlich der Wahrscheinlichkeitstheorie. Übereinstimmung herrscht in der bevorzugten Betrachtung des Empfanges von

endlich vielen, diskreten Meßinformationen. Es wird auf die Fragen der Meßstochastik für die optimale Informationsgewinnung durch Meßgeber und auf die Folgerungen aus der SHANNONSchen Theorie für die Meßtechnik aus Gründen des Buchumfanges in diesem Buch nicht eingegangen, zumal diese ausführlich im Buch von KRAUS/WOSCHNI ([9]) behandelt worden sind. Auch wird auf innermathematische Probleme, z. B. der Maß-Theorie, und auf den semantischen Aspekt nicht eingegangen.

Vielmehr stehen neben einigen klassischen Methoden der Meßwertübertragung die Probleme der Informations-Reduktion und der Störfestigkeit bei der Meßwert-Verarbeitung und Kenngrößen-Bildung im Vordergrund. Es handelt sich mehr um den pragmatischen Aspekt, d. h. nach KLAUS ([34]) um Relationen, die die Beziehungen zwischen den Meßwerten und den Menschen betreffen, die diese Meßwerte oder Zeichen erzeugen und verwenden. Es steht der Gesichtspunkt der praktischen Anwendungsmöglichkeit der Meß-Informationstheorie im Vordergrund. Danach richtet sich der Einsatz der Meßtheorie. Die nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich vorwiegend auf die Meßstochastik, speziell auf die Prozeß-Meßtechnik.

Die *Meßstochastik* ist ein Teilgebiet der Meßtheorie und dient zur Klärung von Fragen der Prozeßanalyse. Es klafft immer noch eine Lücke zwischen der mathematisch gut ausgebauten Theorie der stochastischen Prozesse und der Meßtechnik, die diese Theorie in der Praxis ausnutzt. Das vorliegende Buch soll einen Überblick über die methodischen Grundgedanken der Informationsverarbeitung geben. Überall in der Technik müssen Meßwerte übertragen werden und aus ihnen Kenngrößen zur Beobachtung und zur Steuerung von laufenden Prozessen gewonnen werden. Ähnliche Fragen treten z. B. auch in der medizinischen Diagnostik auf. Hierbei wird aus der Fülle der anfallenden Informationen nur ein Teil ausgenutzt, d. h., es wird stets eine Informationsreduktion durchgeführt. Dabei gilt es, anfallende Störungen zu unterdrücken, um eine hohe Störfestigkeit der Meßwertübertragung und der Meßwertverarbeitung zu erreichen.

Diese Aufgabenstellung läßt sich nur unter weitgehender Anwendung mathematischer Modellvorstellungen erreichen. Die Auswahl der mathematischen Hilfsmittel richtet sich hierbei nach den praktischen Bedürfnissen der Anwendungen. Sie wird durch die technische Aufgabenstellung und deren Randbedingungen stark beeinflusst (Analysis, Algebra, Wahrscheinlichkeitstheorie). Daher ergeben sich die axiomatischen Grundlagen der Lösung von Meßaufgaben erst am Ende, nicht aber wie in der reinen Mathematik am Anfang der Untersuchungen. Die mathematischen Anforderungen überschreiten hier nicht den Rahmen der mathematischen Grundausbildung an den Hochschulen. Erfahrungsgemäß sind sie dem Studenten wesentlich besser bekannt als die zugehörigen Anwendungsmöglichkeiten. Daher verzichtet die Darstellung auf eine nochmalige Ableitung und betont statt dessen die Einsatzmöglichkeit und

die Aussagekraft der mathematischen Hilfsmittel. Sie gibt ferner Hinweise für ihre Auswahl.

Die Mathematik liefert Modelle für die sich abspielenden Prozesse als „Signaltheorie“ und für die angewandten Mittel zur Informationsverarbeitung als „Systemtheorie“ ([36]).

Der 1. Hauptabschnitt beschäftigt sich mit dem Informations-Aspekt der Meßtechnik und mit dem Problem der Informationsbewertung auf der Basis der Informationstheorie und der Stochastik. Als Grundstruktur der informationsverarbeitenden Systeme dient das Modell des zweifach ausgesteuerten Systems, hier als Verbundsystem bezeichnet. Dies ergibt eine Erweiterung der linearen Systemtheorie, die für die Meßtechnik in keiner Weise ausreicht.

Der 2. Hauptabschnitt behandelt die wichtigsten Methoden der Prozeßanalyse vom Standpunkt der Meßtheorie. Es werden Fragen der Klassifizierung und Darstellung von Informationsprozessen behandelt sowie die Methoden zu ihrer Umwandlung für die Zwecke der Meßwertübertragung und Meßwertverarbeitung. Hier werden viele Verfahren der klassischen Nachrichtentechnik von der Meßtechnik benutzt.

Die klassischen Verbundsysteme der Nachrichtentechnik zur Modulation, Abtastung und Kodierung dienen der Meßwertübertragung und arbeiten möglichst ohne Informationsreduktion. Die Verbundsysteme der Meßtechnik nehmen dagegen zur Kenngrößenbildung eine gewisse Informationsreduktion vor. Energetische Kenngrößen werden durch die einfache Analyse gewonnen, die eigentlichen informationshaltigen Kenngrößen aber vor allem durch eine Verbundanalyse ohne oder mit vorangegangener Prozeßwandlung (z. B. Begrenzung). Es zeigt sich, daß die Korrelationsanalyse eng mit anderen Methoden der Verbundanalyse verwandt ist, so daß die Verbundanalyse die universelle Methode zur Kenngrößenbildung ist. Für die Kenngrößenbildung ergeben sich vielfache Möglichkeiten durch die Darstellung im Zeit- oder im Spektral- oder im statistischen Bereich, durch eine vorangehende Prozeßwandlung, z. B. Begrenzung der Amplituden und durch eine Zeit- und Amplitudendiskretisierung des primären Prozesses, speziell unter Umwandlung der Amplitudenwerte in Binärsignale, d. h. durch Binärcodierung. In allen Fällen ist die vorgenommene Informationsreduktion ein Kriterium für die Optimierung der Prozeßanalyse, wobei aus den Momentanwerten Mittelwerte gebildet werden.

Der 3. Hauptabschnitt behandelt ein anderes Optimierungskriterium, die Störfestigkeit der Meßwert-Übertragung und -Auswertung, zunächst aus allgemeiner Sicht betrachtet, dann an je zwei Beispielen für analoge und für digitale Verfahren erläutert.

Zusammenfassend handelt es sich um folgende Fragen:

1. Welche Prozeß-Kenngrößen lassen sich in der Meßtechnik von stochastischen Prozessen bilden?

2. Welche Systeme stehen als Grundstrukturen zur optimalen Informations-Verarbeitung zur Verfügung?
3. Welche Optimierungs-Kriterien treten dabei auf?

Dieser Band behandelt als Übersicht das methodische Konzept der Meßstochastik und setzt zum Verständnis bereits einige Vorkenntnisse voraus mit dem Ziel, die derzeitigen Entwicklungstendenzen der Meßstochastik darzulegen.

Als roten Faden der Darstellung soll der Leser den „algebraischen“ und den „statistischen“ Aspekt der Meßwert-Verarbeitung betrachten. Fragen der Meßwert-Gewinnung durch Meßfühler werden nur gestreift. Die digitale Meßwert-Verarbeitung wird vorrangig behandelt. An Hand ausgewählter methodischer Beispiele — ohne Anspruch auf Vollständigkeit — sollen dem Leser die Grundgedanken der Meßstochastik und ihrer systemtheoretischen Hilfsmittel so dargeboten werden, daß er beim Entwurf von Meßverfahren einen nützlichen Gebrauch machen kann. Dies gilt u. a. auch für den Einsatz von Mikroprozessoren (Minicomputern) mit ihrem minimalen Raum- und Gewichtsbedarf. Es wird gezeigt, welche Aufgaben sie in der Meßtechnik zu erfüllen haben. Die hierfür definierten „Verbund-Systeme“ treten als kleinste System-Strukturen zur Kenngrößen-Verarbeitung auf.

Anregungen zu diesem Buche verdanke ich den IMEKO-Kongressen und den Symposien der technischen Komitees der IMEKO, ferner dem Gedankenaustausch mit den Kollegen Prof. FRITZSCHE (Dresden), Prof. HOFMANN (Jena) und Prof. WOSCHNI (Karl-Marx-Stadt).

Dem Akademie-Verlag danke ich für die Unterstützung bei der Drucklegung, vor allem der Lektorin Frau GISELA LAGOWITZ.

Rostock, im Sommer 1976

F. H. LANGE

Inhalt

1.	Informationsbewertung durch Meßsysteme	1
1.1.	Der Informations-Aspekt der Meßtechnik	1
1.1.1.	Aufgaben der Meßtheorie und der Meßstochastik	1
1.1.2.	Meßbewertung zur Informationsübertragung und zur Informationsspeicherung	8
1.1.2.1.	Zufallsgrößen und Zufallsprozesse als Gegenstand der Meßstochastik, der statistische Aspekt der Meßtechnik	8
1.1.2.2.	Meßbewertung bei nur qualitativ unterscheidbaren Meßereignissen, der algebraische Aspekt der Meßtechnik	13
1.1.3.	Empirische Meßbewertung zur Informations-Verarbeitung	18
1.2.	Der System-Aspekt der Meßtechnik	20
1.2.1.	Die black-box-Darstellung und die Theorie der linearen Systeme	22
1.2.2.	Die Frequenzgang-Beschreibung linearer Systeme	26
1.2.3.	Zum Einsatz der Operatorenrechnungen in der Systemtheorie	31
1.3.	Das Verbundsystem als Grundstruktur der Meßtechnik	34
1.3.1.	Analoge Verbundsysteme	36
1.3.2.	Digitale Verbundsysteme für einstellige Binärsignale	39
1.3.3.	Digitale Verbundsysteme für mehrstellige Binärsignale	43
1.3.3.1.	Anwendungen der Matrizen-Multiplikation	45
1.3.3.2.	Anwendungen der Polynom-Multiplikation	48
2.	Methoden der Informationsverarbeitung stochastischer Prozesse	54
2.1.	Zielstellung und Randbedingungen der Informations-Verarbeitung in der Meßtechnik	54
2.1.1.	Prozeß-Identifizierung und Prozeß-Kontrolle	54
2.1.2.	Signalerkennung und Parameter-Abschätzung bei Störeinflüssen	59
2.2.	Übertragung von Informationsprozessen	61
2.2.1.	Frequenzumsetzung von stochastischen Prozessen durch Modulation	62
2.2.1.1.	Amplitudenmodulation	62
2.2.1.2.	Frequenzmodulation	66
2.2.1.3.	Zeitdauer- und Pulsmodulation	70

2.2.2.	Diskretisierung durch Kodierung	73
2.2.2.1.	Zeitdiskretisierung und Abtastung	73
2.2.2.2.	Amplitudendiskretisierung und Binärkodierung	80
2.3.	Informations-Reduktion durch Kenngrößenbildung	82
2.3.1.	Kenngrößen der einfachen Analyse	83
2.3.1.1.	Amplituden-Verteilungen und Mittelwerte stationärer Prozesse	83
2.3.1.2.	Komponenten-Zerlegung in Standardsignale (FOURIER- und WALSH-Analyse)	90
2.3.1.3.	Kenngrößen instationärer Prozesse, Kurzzeitmittelwerte	108
2.3.2.	Kenngrößen der Verbund-Analyse	112
2.3.2.1.	Korrelations-Analyse, Verbundwahrscheinlichkeit	113
2.3.2.2.	Korrelations-Meßtechnik	122
2.3.2.3.	Cepstrum-Analyse	134
2.3.2.4.	Mehrfach-Verbund-Analyse	138
2.3.3.	Kenngrößenbildung nach einer Prozeßwandlung	140
2.3.3.1.	Amplitudenbegrenzung ohne Informationsreduktion	140
2.3.3.2.	Amplitudenbegrenzung mit Informationsreduktion	144
2.3.3.3.	Klassifizierung der Methoden zur Prozeßwandlung	145
3.	Methoden zur Erhöhung der Störfestigkeit	147
3.1.	Das Entstörproblem aus allgemeiner Sicht	147
3.1.1.	Störeinflüsse auf eine Meßkette	147
3.1.2.	Mittel zur Störfreiung bei Meßprozessen	149
3.1.3.	Störpegel und Störabstand	152
3.2.	Erhöhung der Störfestigkeit bei analogen Verfahren	156
3.2.1.	Methode der Frequenzmodulation	157
3.2.2.	Störfestigkeit der Korrelationsverfahren	160
3.3.	Erhöhung der Störfestigkeit bei digitalen Verfahren	165
3.3.1.	Methode des angepaßten Filters	166
3.3.2.	Methoden der Kodierungsredundanz	174
3.3.2.1.	Anwendung der Matrizen-Multiplikation	176
3.3.2.2.	Anwendung der Polynom-Multiplikation	181
	Literaturverzeichnis	189
	Symbolverzeichnis	194
	Sachwortverzeichnis	197