

Messtechnik

Fernando Puente León • Uwe Kiencke

Messtechnik

Systemtheorie für Ingenieure und Informatiker

9., überarbeitete Auflage



Springer Vieweg

Professor Dr.-Ing. Fernando Puente León
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Industrielle Informationstechnik
Karlsruhe
Deutschland

Professor Dr.-Ing. Uwe Kiencke
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Karlsruhe
Deutschland

Homepage zum Buch:
<http://www.iiit.kit.edu/messtechnik>

ISBN 978-3-642-30073-8
DOI 10.1007/978-3-642-30074-5

ISBN 978-3-642-30074-5 (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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995, 2001, 2005, 2008, 2011, 2012

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

Für Barbara

Vorwort

In der vorliegenden neunten Auflage wurden Struktur und Inhalt des Buches weitestgehend beibehalten, weil sie sich im Lehrbetrieb bewährt haben. Dennoch wurden viele Textpassagen und Beispiele überarbeitet, um die Verständlichkeit des vermittelten Stoffes zu verbessern. Ferner enthalten die Abschnitte 2.2, 3.2, 4.1, 6.1 und 7.2 inhaltliche Ergänzungen.

Dank vielen Anregungen von Hörern der gleichnamigen Vorlesung am Karlsruher Institut für Technologie sowie von Lesern des Buches konnten darüber hinaus Fehler korrigiert werden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Johannes Pallauf für viele anregende Diskussionen sowie für das sorgfältige Korrekturlesen des Manuskriptes. Schließlich möchte ich mich beim Springer-Verlag für die wiederum ausgezeichnete Zusammenarbeit bedanken.

Karlsruhe, im Sommer 2012

Fernando Puente León

Vorwort zur 8. Auflage

Dieses Lehrbuch richtet sich an Studenten der Ingenieurwissenschaften (insbesondere der Elektrotechnik, Informationstechnik, Mechatronik und des Maschinenbaus) sowie der Informatik. Es behandelt die systemtheoretischen Grundlagen der Messtechnik. Dabei werden die allen Messsystemen gemeinsamen Verfahren in den Vordergrund gestellt. Der Inhalt des Buches umfasst

- die Beschreibung des physikalischen Verhaltens von Messsystemen durch ein mathematisches Modell,
- die Verbesserung der statischen sowie der dynamischen Eigenschaften von Messsystemen,
- die Messung zufälliger Größen und stochastischer Signale,
- die rechnergestützte Messdatenerfassung und -verarbeitung sowie
- die Erfassung frequenzanaloger Signale.

Vorausgesetzt werden Kenntnisse der gebräuchlichen Integraltransformationen und der Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Bei den Herleitungen von Formeln sind alle notwendigen Zwischenschritte angegeben, damit der Leser sich den Stoff auch im Selbststudium aneignen kann.

Bei der Ausarbeitung dieses Buches fand ich das Buch *Messtechnik* (Springer-Verlag, 7. Auflage, 2008) meines verehrten Vorgängers, Herrn Pro-

fessor Uwe Kiencke, vor, das die Messtechnik in der oben geschilderten, systematischen Weise hervorragend aufbereitet. Ich habe es deshalb als Grundlage herangezogen und die Struktur des Buches weitgehend beibehalten, weil sie sich im Lehrbetrieb über viele Jahre bewährt hat.

Inhaltlich wurden im Kapitel *Messsysteme und Messfehler* Messskalen und damit auch die Messung qualitativer Größen eingeführt; ferner wurden die Abschnitte über metrische Größen und Messsysteme deutlich erweitert. Das Kapitel *Zufällige Messfehler* enthält zahlreiche inhaltliche Erweiterungen und neue Beispiele. Exemplarisch seien das Bayes-Theorem, die Behandlung höherer Momente von Verteilungen sowie multivariater Verteilungen und die Eigenschaften von Schätzern genannt. Im Kapitel *Dynamisches Verhalten von Messsystemen* wurde die Gliederung aus didaktischen Überlegungen überarbeitet und es wurden neue Erkenntnisse aus dem Gebiet der Systemoptimierung berücksichtigt. In nahezu jedem Kapitel wurden neue Abbildungen und praktische Beispiele aufgenommen, die ein tieferes Verständnis der behandelten Verfahren und ihrer Einsatzgebiete vermitteln.

Ferner wurde das gesamte Buch inhaltlich und redaktionell überarbeitet und praktisch jede Abbildung neu erstellt, um eine bessere Verständlichkeit sowie eine konsistentere Verwendung der mathematischen Symbole zu erzielen. Bei dieser Gelegenheit wurde die Darstellung von Vektoren und Matrizen an die international übliche Notation angepasst, stochastische Größen wurden zu ihrer leichteren Erkennung konsistent in Schreibmaschienschrift gesetzt.

Darüber hinaus konnten durch Hinweise von Lesern und Hörern Fehler korrigiert und Erläuterungen verbessert werden. Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Marco Kruse für die Erstellung von Matlab-Übungen, für wertvolle Hinweise und Diskussionen sowie für die zweimalige akribische Korrektur des Manuskripts. Von seinem fachkundigen Einsatz und seinem didaktischen Geschick hat dieses Buch außerordentlich stark profitiert. Schließlich sei dem Springer-Verlag für die ausgezeichnete Zusammenarbeit gedankt.

Karlsruhe, im Sommer 2011

Fernando Puente León

Inhaltsverzeichnis

1	Messsysteme und Messfehler	1
1.1	Messskalen	3
1.2	Metrische Größen	5
1.2.1	Einheitensystem	6
1.2.2	Anpassung der Definitionen der Einheiten	8
1.3	Messsysteme	10
1.3.1	Struktur von Messsystemen	10
1.3.2	Beschreibung von Messsystemen im Zustandsraum	12
1.3.3	Physikalische Messkennlinie	13
1.3.4	Messsignale als Informationsträger	14
1.4	Messfehler	16
1.4.1	Absoluter und relativer Fehler	16
1.4.2	Fehlerursachen	17
1.4.3	Spezifizierte Normalbedingungen	20
2	Kurvenanpassung	23
2.1	Approximation	26
2.1.1	Approximation mit orthonormalen Funktionensystemen	26
2.1.1.1	Approximation mit der Fourier-Reihe	29
2.1.1.2	Approximation mit Walsh-Funktionen	30
2.1.2	Least-Squares-Schätzer	31
2.1.3	Regressionsanalyse	32
2.2	Interpolation	34
2.2.1	Polynominterpolation	34
2.2.2	Interpolation durch Lagrange-Polynome	36
2.2.3	Interpolation durch Newton-Polynome	38
2.2.4	Spline-Interpolation	41
2.2.5	Systemtheoretische Deutung der Interpolation	46
2.3	Kennfeldinterpolation	47
3	Stationäres Verhalten von Messsystemen	53
3.1	Stationäre Messkennlinie und deren Fehler	55
3.1.1	Ideale und reale Messkennlinie	55
3.1.2	Abgleich der Messkennlinie	56
3.1.3	Kennlinienfehler bei realer Kennlinie	58
3.1.3.1	Relativer Kennlinienfehler	58
3.1.3.2	Hysterese und Umkehrspanne	59

3.1.4	Abschätzung des Kennlinienfehlers	61
3.2	Kennlinienfehler unter Normalbedingungen	64
3.2.1	Herabsetzen des Messbereichs	64
3.2.2	Reihenschaltung zweier nichtlinearer Glieder	67
3.2.3	Wahl des günstigsten Messbereichs	71
3.2.4	Differenzmethode	77
3.2.5	Gegenkopplung	83
3.3	Kennlinienfehler bei Abweichungen von den Normalbedingungen	87
3.3.1	Superponierende Störgrößen	87
3.3.2	Unterdrückung superponierender Störgrößen mit der Differenzmethode	89
3.3.3	Deformierende Störgrößen	90
3.3.4	Deformierende Störgrößen bei Gegenkopplung	93
3.3.5	Superponierende Störgrößen bei Gegenkopplung	96
3.3.6	Kompensation systematischer Störeinflüsse	97
3.3.7	Abschirmung	98
3.3.8	Superponierende Störgrößen in Messketten	98
3.3.9	Zerhackerverstärker	100
3.4	Rückwirkung des Messsystems	103
4	Zufällige Messfehler	107
4.1	Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie	110
4.1.1	Wahrscheinlichkeitsdichte	112
4.1.2	Wahrscheinlichkeitsdichten abgebildeter Größen	116
4.1.3	Momente der Statistik 1. Ordnung	117
4.1.4	Momente der Statistik 2. Ordnung	120
4.1.5	Korrelationskoeffizient	122
4.1.6	Charakteristische Funktion	125
4.2	Stichproben	126
4.2.1	Häufigkeitsverteilung und Histogramm	127
4.2.2	Stichprobenmittelwert	128
4.2.3	Stichprobenvarianz	131
4.2.4	Gesetz der großen Zahlen	134
4.2.5	Mittelung zur Störungsunterdrückung	136
4.2.5.1	Lineare Kennlinie	136
4.2.5.2	Nichtlineare Kennlinie	137
4.3	Normalverteilte Zufallsvariable	138
4.3.1	Normalverteilung	138

4.3.2	Zentraler Grenzwertsatz	141
4.3.3	χ^2 -Verteilung	142
4.3.4	Student'sche t-Verteilung	147
4.4	Statistische Testverfahren	148
4.4.1	Konfidenzintervall und statistische Sicherheit	149
4.4.1.1	Konfidenzintervall bei bekannter Standardabweichung	149
4.4.1.2	Konfidenzintervall bei geschätzter Standardabweichung	152
4.4.2	Hypothesen und statistische Tests	155
4.4.3	Signifikanztest für den Stichprobenmittelwert	156
4.4.4	χ^2 -Anpassungstest	157
4.5	Qualitätssicherung	161
4.5.1	Beurteilung von Fertigungsprozessen	161
4.5.2	Bestimmung der Ausfallrate	164
4.5.3	Statistische Prozessüberwachung	169
4.6	Fehlerfortpflanzung	173
5	Dynamisches Verhalten von Messsystemen	179
5.1	Beschreibung von Messsystemen	181
5.1.1	Systemeigenschaften	181
5.1.2	Lineare, zeitinvariante Systeme (LTI-Systeme)	182
5.1.3	Stabilität	184
5.2	Empirische Analyse von Messsystemen	186
5.2.1	Kennwerte der Sprungantwort	186
5.2.2	Nichtlineares dynamisches Verhalten	187
5.2.3	Bestimmung des Frequenzganges	188
5.3	Verbesserung des dynamischen Systemverhaltens	192
5.3.1	Optimierung der Systemparameter	193
5.3.2	Änderung der Systemstruktur	194
5.4	Parameteroptimierung	195
5.4.1	Kriterium „verschwindende Momente der Impulsantwort“	198
5.4.2	Kriterium „konstanter Amplitudengang für kleine Frequenzen“	202
5.4.3	Kriterium „konstanter Realteil des Frequenzganges“	208
5.4.4	ITAE-Kriterium	214
5.4.4.1	System 1. Ordnung	214
5.4.4.2	System 2. Ordnung	215

5.4.5	Kriterium „quadratisches Fehlerintegral“	219
5.5	Strukturänderung zur Optimierung des Zeitverhaltens	226
5.5.1	Kompensation des Zeitverhaltens	226
5.5.2	Zeitverhalten bei Gegenkopplung	231
5.5.2.1	P-Regler	232
5.5.2.2	PI-Regler	236
6	Messung stochastischer Signale	241
6.1	Stochastische Prozesse	245
6.1.1	Einführung	245
6.1.2	Wahrscheinlichkeitsverteilung und Wahrscheinlichkeitsdichte	247
6.1.3	Schar- und Zeitmittelwerte	250
6.1.4	Momente der Statistik 1. Ordnung	250
6.1.5	Momente der Statistik 2. Ordnung	252
6.1.6	Stationäre Prozesse	254
6.1.7	Ergodische Prozesse	256
6.2	Korrelationsfunktionen	261
6.2.1	Signalklassen	261
6.2.1.1	Ergodische Prozesse	263
6.2.1.2	Funktionenräume	263
6.2.2	Korrelation von Leistungssignalen	265
6.2.3	Korrelation von Energiesignalen	267
6.2.4	Eigenschaften von Auto- und Kreuzkorrelationsfunktion	269
6.3	Korrelationsmesstechnik	271
6.3.1	Messung von Korrelationsfunktionen	271
6.3.2	Ähnlichkeit von Signalen, Laufzeitmessung	272
6.3.3	Closed-loop-Korrelation	278
6.3.4	Polaritätskorrelation	280
6.3.5	Ähnlichkeit von Spektren, Dopplerfrequenzmessung	281
6.3.6	Selbstähnlichkeit	284
6.4	Spektrale Darstellung stochastischer Signale	285
6.4.1	Leistungsdichtespektrum	285
6.4.2	Rauschen	288
6.4.3	Überlagerung zufälliger Störsignale	293
6.4.4	Übertragung stochastischer Signale durch LTI-Systeme	295
6.5	Systemidentifikation	298
6.5.1	Schätzung des Leistungsdichtespektrums	299
6.5.2	Systemidentifikation bei geschätzter Leistungsdichte	301

6.5.2.1	Quotientenbildung gemittelter Periodogramme	301
6.5.2.2	Quotientenbildung gemittelter Kreuz- leistungsdichten	302
6.5.3	Dynamische Systemidentifikation	303
6.6	Wiener-Filter	304
6.6.1	Signalmodell	305
6.6.2	Herleitung des Wiener-Filters	307
6.6.3	Wiener-Filter bei linearer Verzerrung und additivem Rauschen	308
7	Erfassung analoger Signale	315
7.1	Abtastung	318
7.1.1	Abtasttheorem	318
7.1.2	Bandüberlappungsfehler (<i>Aliasing</i>)	320
7.1.3	Anti-Aliasing-Filter	322
7.1.4	Mittelwertbildung bei endlicher Abtastdauer	325
7.1.5	Zeitliche Abtastfehler	328
7.2	Quantisierung	333
7.2.1	Wahrscheinlichkeitsdichte der Signalwerte	336
7.2.2	Amplitudendichte der Fourier-Reihe	337
7.2.3	Quantisierungstheorem	340
7.2.4	Wahrscheinlichkeitsdichte des Quantisierungsfehlers	345
7.2.5	Signal-Rausch-Verhältnis infolge der Quantisierung	347
7.2.5.1	Sinusförmige Signale	348
7.2.5.2	Signale mit gleichverteilten Amplituden	348
7.2.6	Optimale Quantisierung	349
7.2.7	Minimierung des relativen Quantisierungsfehlers	349
7.2.8	Dithering	352
7.3	Analog-Digital-Umsetzer	357
7.3.1	A/D-Nachlaufumsetzer	357
7.3.2	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Approximation	359
7.3.3	Integrierende A/D-Umsetzer	360
7.3.4	Delta-Sigma-Umsetzer	363
7.3.4.1	Delta-Sigma-Modulator	363
7.3.4.2	Rauschformung (<i>noise shaping</i>)	365
7.3.4.3	Digitalfilter	368
7.3.4.4	Stationäres Verhalten	369
7.3.5	Ratiometrische Messung	372
7.4	Digital-Analog-Umsetzer	372

7.4.1	Parallele D/A-Umsetzer	373
7.4.1.1	D/A-Umsetzer mit dyadisch gestuften Widerständen	373
7.4.1.2	D/A-Umsetzer mit $R/2R$ -Kettenleiternetzwerk	373
7.4.2	Serielle D/A-Umsetzer	375
8	Erfassung frequenzanaloger Signale	379
8.1	Allgemeiner Frequenzbegriff	382
8.2	Digitale Drehzahlmessung	389
8.2.1	Periodendauermessung	390
8.2.2	Frequenzmessung	391
8.2.3	Maximaler Quantisierungsfehler für einen Zählvorgang	392
8.2.3.1	Quantisierungsfehler bei der Periodendauer- messung	393
8.2.3.2	Quantisierungsfehler bei der Frequenzmes- sung	393
8.2.4	Mittelwertbildung bei der Drehzahlmessung	395
8.2.5	Abtastung bei der Drehzahlmessung	397
8.2.6	Quantisierung bei fortlaufenden Periodendauer- messungen	398
8.2.7	Leistungsdichte des Quantisierungsfehlers	402
8.2.8	Kompensation mechanischer Fehler des Sensorrades	405
8.2.8.1	Stochastische Zahnflankenfehler	405
8.2.8.2	Schätzung der Zahnflankenfehler	407
8.3	Kontinuierliche Frequenzmessung	411
8.3.1	Phasenregelkreis	411
8.3.2	Frequenzregelkreis	416
8.4	Positions- und Richtungserkennung	418
8.4.1	Drehrichtungserkennung	418
8.4.2	Positionsbestimmung	420
A	Symbole und Tabellen	423
A.1	Symbolverzeichnis	425
A.1.1	Konventionen	425
A.1.2	Operatoren	425
A.1.3	Lateinische Symbole	425
A.1.4	Griechische Symbole	429
A.2	Tabellen	430
	Literaturverzeichnis	431

Inhaltsverzeichnis

XV

Index

435