

Fernando Puente León • Uwe Kiencke

Messtechnik

Systemtheorie für Ingenieure und Informatiker

9., überarbeitete Auflage

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