

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	9
1.3	Messsysteme	9
1.3.1	Struktur von Messsystemen	9
1.3.2	Beschreibung von Messsystemen im Zustandsraum	11
1.3.3	Physikalische Messkennlinie	13
1.3.4	Messsignale als Informationsträger	13
1.4	Messfehler	15
1.4.1	Absoluter und relativer Fehler	16
1.4.2	Fehlerursachen	17
1.4.3	Spezifizierte Normalbedingungen	19
1.5	Literatur	22
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	29
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	35
2.2.3	Interpolation durch Newton-Polynome	37
2.2.4	Spline-Interpolation	41
2.2.5	Systemtheoretische Deutung der Interpolation	45
2.3	Kennfeldinterpolation	47
2.4	Literatur	51
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	60
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	70
3.2.4	Differenzmethode	76
3.2.5	Gegenkopplung	82
3.3	Kennlinienfehler bei Abweichungen von den Normalbedingungen .	86
3.3.1	Superponierende Störgrößen	86
3.3.2	Unterdrückung superponierender Störgrößen mit der Differenzmethode	88
3.3.3	Deformierende Störgrößen	89
3.3.4	Deformierende Störgrößen bei Gegenkopplung	92
3.3.5	Superponierende Störgrößen bei Gegenkopplung	95
3.3.6	Kompensation systematischer Störeinflüsse	95
3.3.7	Abschirmung	96
3.3.8	Superponierende Störgrößen in Messketten	96
3.3.9	Zerhackerverstärker	98
3.4	Rückwirkung des Messsystems	101
3.5	Literatur	104
4	Zufällige Messfehler	105
4.1	Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie	109
4.1.1	Wahrscheinlichkeitsdichte	112
4.1.2	Wahrscheinlichkeitsdichten abgebildeter Größen	117
4.1.3	Momente der Statistik 1. Ordnung	118
4.1.4	Momente der Statistik 2. Ordnung	121
4.1.5	Korrelationskoeffizient	123
4.1.6	Charakteristische Funktion	126
4.2	Stichproben	127
4.2.1	Häufigkeitsverteilung und Histogramm	128
4.2.2	Parameterschätzung	129
4.2.2.1	Stichprobenmittelwert	130
4.2.2.2	Stichprobenvarianz	132
4.2.2.3	Numerische Berechnung von Mittelwert und Varianz	134
4.2.3	Gesetz der großen Zahlen	135

4.2.4	Mittelung zur Störungsunterdrückung	137
4.2.4.1	Lineare Kennlinie	137
4.2.4.2	Nichtlineare Kennlinie	138
4.3	Normalverteilte Zufallsvariable	139
4.3.1	Normalverteilung	139
4.3.2	Zentraler Grenzwertsatz	141
4.3.3	χ^2 -Verteilung	143
4.3.4	Student'sche t-Verteilung	147
4.4	Statistische Testverfahren	148
4.4.1	Konfidenzintervall und statistische Sicherheit	148
4.4.1.1	Konfidenzintervall bei bekannter Standard- abweichung	149
4.4.1.2	Konfidenzintervall bei geschätzter Standard- abweichung	152
4.4.2	Hypothesen und statistische Tests	154
4.4.3	Signifikanztest für den Stichprobenmittelwert	155
4.4.4	χ^2 -Anpassungstest	157
4.5	Qualitätssicherung	161
4.5.1	Beurteilung von Fertigungsprozessen	161
4.5.2	Bestimmung der Ausfallrate	163
4.5.3	Statistische Prozessüberwachung	168
4.6	Fehlerfortpflanzung	173
4.7	Literatur	176
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	191
5.3.1	Optimierung der Systemparameter	193
5.3.2	Änderung der Systemstruktur	193
5.4	Parameteroptimierung	194
5.4.1	Kriterium „verschwindende Momente der Impulsantwort“	197

5.4.2	Kriterium „konstanter Amplitudengang für kleine Frequenzen“	200
5.4.3	Kriterium „konstanter Realteil des Frequenzganges“	205
5.4.4	ITAE-Kriterium	212
5.4.4.1	System 1. Ordnung	213
5.4.4.2	System 2. Ordnung	213
5.4.5	Kriterium „quadratisches Fehlerintegral“	217
5.5	Strukturänderung zur Optimierung des Zeitverhaltens	224
5.5.1	Kompensation des Zeitverhaltens	224
5.5.2	Zeitverhalten bei Gegenkopplung	228
5.5.2.1	P-Regler	230
5.5.2.2	PI-Regler	234
5.6	Literatur	237
6	Stochastische Signale	239
6.1	Stochastische Prozesse	243
6.1.1	Einführung	243
6.1.2	Wahrscheinlichkeitsverteilung und Wahrscheinlichkeitsdichte	245
6.1.3	Schar- und Zeitmittelwerte	248
6.1.4	Momente der Statistik 1. Ordnung	249
6.1.5	Momente der Statistik 2. Ordnung	249
6.1.6	Stationäre Prozesse	252
6.1.7	Ergodische Prozesse	254
6.2	Korrelationsfunktionen	258
6.2.1	Signalklassen	258
6.2.1.1	Ergodische Prozesse	260
6.2.1.2	Funktionenräume	260
6.2.2	Korrelation von Leistungssignalen	261
6.2.3	Korrelation von Energiesignalen	263
6.2.4	Eigenschaften von Auto- und Kreuzkorrelationsfunktion	265
6.3	Korrelationsmesstechnik	267
6.3.1	Messung von Korrelationsfunktionen	267
6.3.2	Ähnlichkeit von Signalen, Laufzeitmessung	268
6.3.3	Closed-loop-Korrelation	273
6.3.4	Polaritätskorrelation	276
6.3.5	Ähnlichkeit von Spektren, Dopplerfrequenzmessung	278
6.3.6	Selbstähnlichkeit	280
6.4	Spektrale Darstellung stochastischer Signale	281

6.4.1	Leistungsdichtespektrum	281
6.4.2	Rauschen	284
6.4.3	Überlagerung zufälliger Störsignale	289
6.4.4	Übertragung stochastischer Signale durch LTI-Systeme	290
6.5	Systemidentifikation	294
6.5.1	Schätzung des Leistungsdichtespektrums	295
6.5.2	Systemidentifikation bei geschätzter Leistungsdichte	297
6.5.2.1	Quotientenbildung gemittelter Periodogramme	297
6.5.2.2	Quotientenbildung gemittelter Kreuzleistungs- dichten	297
6.5.3	Dynamische Systemidentifikation	298
6.6	Signaldetektion	300
6.6.1	Signalmodell	300
6.6.2	Matched-Filter	301
6.6.3	Matched-Filter bei farbigem Rauschen	302
6.7	Wiener-Filter	304
6.7.1	Signalmodell	305
6.7.2	Herleitung des Wiener-Filters	306
6.7.3	Wiener-Filter bei linearer Verzerrung und additivem Rauschen	307
6.8	Literatur	314
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	323
7.1.4	Mittelwertbildung bei endlicher Abtastdauer	325
7.1.5	Zeitliche Abtastfehler	329
7.2	Quantisierung	333
7.2.1	Wahrscheinlichkeitsdichte der Signalwerte	336
7.2.2	Amplitudendichte der Fourier-Reihe	338
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	348
7.2.7	Minimierung des relativen Quantisierungsfehlers	349

7.2.8	Dithering	352
7.3	Analog-Digital-Umsetzer	356
7.3.1	A/D-Nachlaufumsetzer	357
7.3.2	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Approximation	358
7.3.3	Integrierende A/D-Umsetzer	360
7.3.4	Delta-Sigma-Umsetzer	362
7.3.4.1	Delta-Sigma-Modulator	362
7.3.4.2	Rauschformung (<i>noise shaping</i>)	364
7.3.4.3	Digitalfilter	366
7.3.4.4	Stationäres Verhalten	367
7.3.5	Ratiometrische Messung	370
7.4	Digital-Analog-Umsetzer	370
7.4.1	Parallele D/A-Umsetzer	371
7.4.1.1	D/A-Umsetzer mit dyadisch gestuften Widerständen	371
7.4.1.2	D/A-Umsetzer mit $R/2R$ -Kettenleiternetzwerk	372
7.4.2	Serielle D/A-Umsetzer	373
7.5	Literatur	376
8	Frequenz- und Drehzahlmessung	379
8.1	Allgemeiner Frequenzbegriff	382
8.2	Digitale Drehzahlmessung	388
8.2.1	Periodendauermessung	390
8.2.2	Frequenzmessung	390
8.2.3	Maximaler Quantisierungsfehler für einen Zählvorgang	392
8.2.3.1	Quantisierungsfehler bei der Periodendauer- messung	392
8.2.3.2	Quantisierungsfehler bei der Frequenzmessung	393
8.2.4	Mittelwertbildung bei der Drehzahlmessung	394
8.2.5	Abtastung bei der Drehzahlmessung	397
8.2.6	Quantisierung bei fortlaufenden Periodendauermessungen	398
8.2.7	Leistungsdichte des Quantisierungsfehlers	402
8.2.8	Kompensation mechanischer Fehler des Sensorrades	404
8.2.8.1	Stochastische Zahnflankenfehler	405
8.2.8.2	Schätzung der Zahnflankenfehler	406
8.3	Kontinuierliche Frequenzmessung	410
8.3.1	Phasenregelkreis	410
8.3.2	Frequenzregelkreis	414
8.4	Positions- und Richtungserkennung	416

8.4.1	Drehrichtungserkennung	416
8.4.2	Positionsbestimmung	418
8.5	Literatur	421
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
	Index	431