

Inhaltsverzeichnis

1 Messsysteme und Messfehler	3
1.1 Messskalen	3
1.2 Metrische Größen	5
1.2.1 Einheitensystem	5
1.2.2 Anpassung der Definitionen der Einheiten	8
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	12
1.3.4 Messsignale als Informationsträger	13
1.4 Messfehler	15
1.4.1 Absoluter und relativer Fehler	15
1.4.2 Fehlerursachen	16
1.4.3 Spezifizierte Normalbedingungen	18
2 Kurvenanpassung	25
2.1 Approximation	26
2.1.1 Approximation mit orthonormalen Funktionensystemen	26
2.1.2 Least-Squares-Schätzer	30
2.1.3 Regressionsanalyse	31
2.2 Interpolation	33
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	40
2.2.5 Systemtheoretische Deutung der Interpolation	44
2.3 Kennfeldinterpolation	45
3 Stationäres Verhalten von Messsystemen	53
3.1 Stationäre Messkennlinie und deren Fehler	53
3.1.1 Ideale und reale Messkennlinie	53
3.1.2 Abgleich der Messkennlinie	54
3.1.3 Kennlinienfehler bei realer Kennlinie	56
3.1.4 Abschätzung des Kennlinienfehlers	58
3.2 Kennlinienfehler unter Normalbedingungen	62
3.2.1 Herabsetzen des Messbereichs	62
3.2.2 Reihenschaltung zweier nichtlinearer Glieder	65

3.2.3	Wahl des günstigsten Messbereichs	68
3.2.4	Differenzmethode	74
3.2.5	Gegenkopplung	80
3.3	Kennlinienfehler bei Abweichungen von den Normalbedingungen	83
3.3.1	Superponierende Störgrößen	84
3.3.2	Unterdrückung superponierender Störgrößen mit der Differenzmethode	85
3.3.3	Deformierende Störgrößen	87
3.3.4	Deformierende Störgrößen bei Gegenkopplung	89
3.3.5	Superponierende Störgrößen bei Gegenkopplung	93
3.3.6	Kompensation systematischer Störeinflüsse	93
3.3.7	Abschirmung	94
3.3.8	Superponierende Störgrößen in Messketten	94
3.3.9	Zerhackerverstärker	95
3.4	Rückwirkung des Messsystems	99
4	Zufällige Messfehler	105
4.1	Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie	105
4.1.1	Wahrscheinlichkeitsdichte	108
4.1.2	Wahrscheinlichkeitsdichten abgebildeter Größen	111
4.1.3	Erwartungswerte 1. Ordnung	112
4.1.4	Erwartungswerte 2. Ordnung	114
4.1.5	Korrelationskoeffizient	116
4.1.6	Charakteristische Funktion	119
4.2	Stichproben	120
4.2.1	Häufigkeitsverteilung und Histogramm	120
4.2.2	Stichprobenmittelwert	122
4.2.3	Stichprobenvarianz	124
4.2.4	Gesetz der großen Zahlen	127
4.2.5	Mittelung zur Störungsunterdrückung	129
4.3	Normalverteilte Zufallsvariable	131
4.3.1	Normalverteilung	131
4.3.2	Zentraler Grenzwertsatz	133
4.3.3	χ^2 -Verteilung	134
4.3.4	Student'sche t-Verteilung	139
4.4	Statistische Testverfahren	140
4.4.1	Konfidenzintervall und statistische Sicherheit	140
4.4.2	Hypothesen und statistische Tests	146
4.4.3	Signifikanztest für den Stichprobenmittelwert	147
4.4.4	χ^2 -Anpassungstest	149

4.5	Qualitätssicherung	153
4.5.1	Beurteilung von Fertigungsprozessen	153
4.5.2	Bestimmung der Ausfallrate	155
4.5.3	Statistische Prozessüberwachung	159
4.6	Fehlerfortpflanzung	164
5	Dynamisches Verhalten von Messsystemen	171
5.1	Beschreibung von Messsystemen	171
5.1.1	Systemeigenschaften	171
5.1.2	Lineare, zeitinvariante Systeme (LTI-Systeme)	172
5.1.3	Stabilität	174
5.2	Empirische Analyse von Messsystemen	175
5.2.1	Kennwerte der Sprungantwort	176
5.2.2	Nichtlineares dynamisches Verhalten	177
5.2.3	Bestimmung des Frequenzganges	178
5.3	Verbesserung des dynamischen Systemverhaltens	180
5.4	Parameteroptimierung	183
5.4.1	Kriterium „verschwindende Momente der Impulsantwort“	186
5.4.2	Kriterium „konstanter Amplitudengang für kleine Frequenzen“	189
5.4.3	Kriterium „konstanter Realteil des Frequenzganges“ . .	194
5.4.4	ITAE-Kriterium	200
5.4.5	Kriterium „quadratisches Fehlerintegral“	206
5.5	Strukturänderung zur Optimierung des Zeitverhaltens	212
5.5.1	Kompensation des Zeitverhaltens	212
5.5.2	Zeitverhalten bei Gegenkopplung	217
6	Messung stochastischer Signale	229
6.1	Stochastische Prozesse	229
6.1.1	Wahrscheinlichkeitsverteilung und Wahrscheinlichkeitsdichte	231
6.1.2	Schar- und Zeitmittelwerte, Momente erster Ordnung .	233
6.1.3	Momente zweiter Ordnung	235
6.1.4	Stationäre Prozesse	237
6.1.5	Ergodische Prozesse	238
6.2	Korrelationsfunktionen	242
6.2.1	Signalklassen	242
6.2.2	Korrelation für Leistungssignale	245
6.2.3	Korrelation für Energiesignale	247
6.2.4	Eigenschaften der Korrelationsfunktionen	249

6.3	Korrelationsmesstechnik	251
6.3.1	Messung von Korrelationsfunktionen	251
6.3.2	Ähnlichkeit von Signalen, Laufzeitmessung	252
6.3.3	Closed-loop-Korrelation	257
6.3.4	Polaritätskorrelation	260
6.3.5	Ähnlichkeit von Spektren, Dopplerfrequenzmessung	261
6.3.6	Selbstähnlichkeit	263
6.4	Leistungsdichtespektrum	265
6.4.1	Rauschen	267
6.4.2	Überlagerung zufälliger Störsignale	272
6.4.3	Übertragung stochastischer Signale durch LTI-Systeme	273
6.4.4	Systemidentifikation	276
6.4.5	Wiener-Filter	282
7	Erfassung analoger Signale	295
7.1	Abtastung	296
7.1.1	Bandüberlappungsfehler (<i>Aliasing</i>)	298
7.1.2	Anti-Aliasing-Filter	299
7.1.3	Mittelwertbildung bei endlicher Abtastdauer	302
7.1.4	Zeitliche Abtastfehler	305
7.2	Quantisierung	310
7.2.1	Wahrscheinlichkeitsdichten von Signalamplituden	312
7.2.2	Amplitudendichte einer Fourier-Reihe	314
7.2.3	Quantisierungstheorem	317
7.2.4	Wahrscheinlichkeitsdichte des Quantisierungsfehlers	321
7.2.5	Optimale Quantisierung	324
7.2.6	Minimierung des relativen Quantisierungsfehlers	325
7.2.7	Dithering	328
7.3	Analog-Digital-Umsetzer	333
7.3.1	A/D-Nachlaufumsetzer	333
7.3.2	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Approximation	334
7.3.3	Integrierende A/D-Umsetzer	336
7.3.4	Delta-Sigma-Umsetzer	338
7.3.5	Ratiometrische Messung	347
7.4	Digital-Analog-Umsetzer	347
7.4.1	Parallele D/A-Umsetzer	348
7.4.2	Serielle D/A-Umsetzer	350
8	Erfassung frequenzanaloger Signale	355
8.1	Allgemeiner Frequenzbegriff	356

8.2	Digitale Drehzahlmessung	362
8.2.1	Periodendauermessung	363
8.2.2	Frequenzmessung	365
8.2.3	Maximaler Quantisierungsfehler für einen Zählvorgang	366
8.2.4	Mittelwertbildung bei der Drehzahlmessung	368
8.2.5	Abtastung bei der Drehzahlmessung	370
8.2.6	Quantisierung bei fortlaufenden Periodendauermessungen	371
8.2.7	Leistungsdichte des Quantisierungsfehlers	375
8.2.8	Kompensation mechanischer Fehler des Sensorrades .	378
8.3	Kontinuierliche Frequenzmessung	382
8.3.1	Phasenregelkreis	384
8.3.2	Frequenzregelkreis	388
8.4	Positions- und Richtungserkennung	390
8.4.1	Drehrichtungserkennung	390
8.4.2	Positionsbestimmung	392
A	Symbole und Tabellen	397
A.1	Symbole	397
A.2	Tabellen	400
Literaturverzeichnis		401
Index		405