

Inhaltsverzeichnis

1. Messsysteme und Messfehler	1
1.1 Messen	1
1.1.1 Einheitensystem	1
1.2 Messsysteme	3
1.2.1 Physikalische Messkennlinie	4
1.3 Fehler, ihre Definition und Ursachen	5
1.3.1 Definition des Fehlers	6
1.3.2 Fehlerursachen	7
1.3.3 Spezifizierte Normalbedingungen	8
2. Kurvenanpassung	13
2.1 Approximation mit orthonormalen Funktionensystemen	14
2.2 Least-Squares-Schätzer	18
2.2.1 Regressionsrechnung	19
2.3 Kennlinieninterpolation	21
2.3.1 Interpolation durch Lagrange-Polynome	21
2.3.2 Interpolation durch Newton-Polynome	24
2.3.3 Spline-Interpolation	27
2.4 Kennfeld-Interpolation	31
3. Stationäres Verhalten von Messsystemen	37
3.1 Stationäre Messkennlinie und deren Fehler	37
3.1.1 Abgleich, Justierung der Messkennlinie	37
3.1.2 Ideale und reale Messkennlinie	38
3.1.3 Kennlinienfehler bei realer Kennlinie	39
3.1.4 Abschätzung des Kennlinienfehlers	42
3.2 Kennlinienfehler unter Normalbedingungen	45
3.2.1 Herabsetzen des Messbereichs	46
3.2.2 Hintereinanderschalten zweier nichtlinearer Glieder	47
3.2.3 Wahl des günstigsten Messbereichs	51
3.2.4 Differenzmethode	57
3.2.5 Gegenkopplung	62
3.3 Kennlinienfehler bei Abweichungen von den Normalbedingungen ..	66
3.3.1 Superponierende Störgrößen	66

3.3.2	Eliminierung superponierender Störgrößen mit der Differenzmethode	68
3.3.3	Deformierende Störgrößen	69
3.3.4	Deformierende Störgrößen bei Gegenkopplung	72
3.3.5	Superponierende Störgrößen bei Gegenkopplung	75
3.3.6	Kompensation systematischer Störeinflüsse	75
3.3.7	Abschirmung von Störgrößen	76
3.3.8	Superponierende Störgrößen in Messketten	76
3.3.9	Synchroner Zerhackerverstärker	78
3.4	Rückwirkung des Messsystems	81
4.	Dynamisches Verhalten von Messsystemen	85
4.1	Dynamische Fehler von Messsystemen	85
4.1.1	Empirische Kennwerte der Sprungantwort	85
4.1.2	Nichtlineares Zeitverhalten	86
4.1.3	Bestimmung des Frequenzganges	86
4.2	Systembeschreibung von Messsystemen	89
4.2.1	Stabilitätskriterium nach Hurwitz	92
4.3	Parameteroptimierung	94
4.3.1	Kriterium verschwindende Momente der Impulsantwort ...	96
4.3.2	Kriterium konstanter Amplitudengang für kleine Frequenzen	100
4.3.3	Kriterium konstanter Realteil des Frequenzganges	104
4.3.4	ITAE-Kriterium	110
4.3.5	Kriterium „Quadratisches Fehlerintegral“	115
4.4	Strukturänderung zur Optimierung des Zeitverhaltens	121
4.4.1	Kompensation des Zeitverhaltens	121
4.4.2	Zeitverhalten bei Gegenkopplung	126
5.	Zufällige Messfehler	135
5.1	Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie	136
5.1.1	Wahrscheinlichkeitsdichte	136
5.1.2	Wahrscheinlichkeitsdichten abgebildeter Größen	139
5.1.3	Erwartungswerte 1. Ordnung	140
5.1.4	Erwartungswerte 2. Ordnung	141
5.1.5	Korrelationskoeffizient	142
5.1.6	Charakteristische Funktion	145
5.2	Stichproben	146
5.2.1	Häufigkeitsverteilung	146
5.2.2	Stichprobenmittelwert	147
5.2.3	Stichprobenvarianz	149
5.2.4	Gesetz der großen Zahlen	151
5.2.5	Mittelwertbildung bei Störungen	153
5.3	Normalverteilte Zufallsvariable	155
5.3.1	Normalverteilung	155
5.3.2	Zentraler Grenzwertsatz	156

5.3.3	χ^2 -Verteilung	157
5.3.4	Student t-Verteilung	161
5.4	Statistische Testverfahren	162
5.4.1	Statistische Sicherheit, Konfidenzintervall	162
5.4.2	Hypothese und Testverfahren	167
5.4.3	Signifikanztest für den Stichprobenmittelwert	168
5.4.4	χ^2 -Anpassungstest	170
5.4.5	Beurteilung von Fertigungsprozessen	173
5.4.6	Bestimmung der Ausfallrate	176
5.4.7	Statistische Prozess-Überwachung	180
5.5	Fehlerfortpflanzung	184
5.5.1	Gaußsches Fehlerfortpflanzungsgesetz	184
5.5.2	Numerische Berechnung von Mittelwert und Varianz	186
6.	Korrelationsmesstechnik	189
6.1	Stochastische Prozesse	189
6.1.1	Wahrscheinlichkeitsdichte	190
6.1.2	Schar- und Zeitmittelwerte, Momente 1. Ordnung	192
6.1.3	Momente 2. Ordnung	194
6.1.4	Stationäre Prozesse	195
6.1.5	Ergodische Prozesse	196
6.2	Korrelationsfunktionen	199
6.2.1	Signalklassen	199
6.2.2	Korrelation für Leistungssignale	202
6.2.3	Korrelation für Energiesignale	204
6.2.4	Eigenschaften	206
6.3	Anwendung der Korrelation	207
6.3.1	Messung von Korrelationsfunktionen	207
6.3.2	Ähnlichkeit von Signalen, Laufzeitmessung	209
6.3.3	Closed-loop Korrelator, Polaritätskorrelation	212
6.3.4	Ähnlichkeit von Spektren, Dopplermessung	216
6.3.5	Selbstähnlichkeit	218
6.4	Leistungsdichtespektrum	219
6.4.1	Rauschen	222
6.4.2	Verknüpfung von Zufallssignalen	226
6.4.3	Leistungsdichtespektrum in LTI-Systemen	227
6.4.4	Systemidentifikation	231
6.4.5	Wiener Filter	235
7.	Erfassung amplitudenanaloger Signale	243
7.1	Abtastung	244
7.1.1	Aliasing	246
7.1.2	Anti-Aliasing-Filter	247
7.1.3	Mittelwertbildung bei endlicher Abtastdauer	249
7.1.4	Zeitliche Abtastfehler	252

7.2	Quantisierung	256
7.2.1	Wahrscheinlichkeitsdichten von Signalamplituden	259
7.2.2	Amplitudendichte einer Fourier-Reihe	261
7.2.3	Quantisierungstheorem	262
7.2.4	Wahrscheinlichkeitsdichte des Quantisierungsfehlers	267
7.2.5	Dither	269
7.3	Analog-Digital-Umsetzer	274
7.3.1	Integrierender AD-Umsetzer	274
7.3.2	Verzögert nachlaufender AD-Umsetzer	276
7.3.3	Sigma-Delta-Wandler	277
7.3.4	AD-Umsetzer mit sukzessiver Approximation	284
7.3.5	Ratiometrische Messung	286
7.3.6	Nichtlineare Kennlinie des AD-Umsetzers	287
7.4	Digital-Analog-Umsetzer	288
7.4.1	Parallele DA-Umsetzer	289
7.4.2	Serielle DA-Umsetzer	291
8.	Erfassung frequenzanaloger Signale	295
8.1	Allgemeiner Frequenzbegriff	296
8.2	Digitale Drehzahlmessung	301
8.2.1	Periodendauermessung	302
8.2.2	Frequenzzählung	304
8.2.3	Maximaler Quantisierungsfehler für einen Zählvorgang	304
8.2.4	Mittelwertbildung bei der Drehzahlmessung	306
8.2.5	Abtastung bei der Drehzahlmessung	309
8.2.6	Quantisierung bei fortlaufenden Periodendauermessungen ..	310
8.2.7	Leistungsdichte des Quantisierungsfehlers	314
8.2.8	Kompensation mechanischer Fehler des Sensorrades	316
8.3	Kontinuierliche Frequenzmessung	321
8.3.1	Frequenzregelkreis	322
8.3.2	Phasenregelkreis	323
8.4	Positions- und Richtungserkennung	327
8.4.1	Drehrichtungserkennung	327
8.4.2	Positionsbestimmung mit Inkrementalgebern	329
Symbole	331	
Literaturverzeichnis	335	
Index	337	