

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	9
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	40
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	63
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	76
3.3.7	Abschirmung von Störgrößen	76
3.3.8	Superponierende Störgrößen in Meßketten	77
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	93
4.3	Parameteroptimierung	94
4.3.1	Kriterium verschwindende Momente der Impulsantwort	97
4.3.2	Kriterium konstanter Amplitudengang für kleine Frequenzen	100
4.3.3	Kriterium konstanter Realteil des Frequenzganges	105
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	127
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	152
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	158
5.3.4	Student t-Verteilung	162
5.4	Statistische Testverfahren	162
5.4.1	Statistische Sicherheit, Konfidenzintervall	163
5.4.2	Hypothese und Testverfahren	168
5.4.3	Signifikanztest für den Stichprobenmittelwert	168
5.4.4	χ^2 -Anpassungstest	170
5.4.5	Beurteilung von Fertigungsprozessen	174
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	203
6.2.3	Korrelation für Energiesignale	204
6.2.4	Eigenschaften	206
6.3	Anwendung der Korrelation	207
6.3.1	Messung von Korrelationsfunktionen	208
6.3.2	Ähnlichkeit von Signalen, Laufzeitmessung	209
6.3.3	Closed-loop Korrektor, Polaritätskorrelation	212
6.3.4	Ähnlichkeit von Spektren, Dopplermessung	215
6.3.5	Selbstähnlichkeit	219
6.4	Leistungsdichtespektrum	219
6.4.1	Rauschen	222
6.4.2	Verknüpfung von Zufallssignalen	227
6.4.3	Leistungsdichtespektrum in LTI-Systemen	228
6.4.4	Systemidentifikation	231
6.4.5	Wiener Filter	236
7.	Erfassung amplitudenanaloger Signale	245
7.1	Abtastung	246
7.1.1	Aliasing	248
7.1.2	Anti-Aliasing-Filter	249
7.1.3	Mittelwertbildung bei endlicher Abtastdauer	252

7.1.4	Zeitliche Abtastfehler	255
7.2	Quantisierung	259
7.2.1	Wahrscheinlichkeitsdichten von Signalamplituden	261
7.2.2	Amplitudendichte einer Fourier-Reihe	263
7.2.3	Quantisierungstheorem	265
7.2.4	Wahrscheinlichkeitsdichte des Quantisierungsfehlers	269
7.2.5	Dither	272
7.3	Analog-Digital-Umsetzer	276
7.3.1	Integrierender AD-Umsetzer	276
7.3.2	Verzögert nachlaufender AD-Umsetzer	277
7.3.3	Sigma-Delta-Wandler	279
7.3.4	AD-Umsetzer mit sukzessiver Approximation	287
7.3.5	Ratiometrische Messung	289
7.3.6	Nichtlineare Kennlinie des AD-Umsetzers	289
7.4	Digital-Analog-Umsetzer	292
7.4.1	Parallele DA-Umsetzer	292
7.4.2	Serielle DA-Umsetzer	294
8.	Erfassung frequenzanaloger Signale	297
8.1	Allgemeiner Frequenzbegriff	298
8.2	Digitale Drehzahlmessung	303
8.2.1	Periodendauermessung	305
8.2.2	Frequenzzählung	305
8.2.3	Maximaler Quantisierungsfehler für einen Zählvorgang	306
8.2.4	Mittelwertbildung bei der Drehzahlmessung	309
8.2.5	Abtastung bei der Drehzahlmessung	311
8.2.6	Quantisierung bei fortlaufenden Periodendauermessungen	312
8.2.7	Leistungsdichte des Quantisierungsfehlers	316
8.2.8	Kompensation mechanischer Fehler des Sensorrades	318
8.3	Kontinuierliche Frequenzmessung	324
8.3.1	Frequenzregelkreis	325
8.3.2	Phasenregelkreis	326
8.4	Positions- und Richtungserkennung	330
8.4.1	Drehrichtungserkennung	330
8.4.2	Positionsbestimmung mit Inkrementalgebern	332
	Symbole	335
	Literaturverzeichnis	339
	Sachverzeichnis	341