

# Vorwort zur 7. Auflage

Nach mehreren Jahren überwiegen die guten Erfahrungen im Lehrbetrieb mit der 6. Auflage des Buches Messtechnik. Weil die 6. Auflage aufgrund der hohen Nachfrage bereits wieder vergriffen ist, haben wir uns entschlossen diese 7. Auflage auf den Weg zu bringen.

In der Erstellung der 6. Auflage haben sich unglücklicherweise Fehler eingeschlichen, die Dank der interessierten Hörer- und Leserschaft entdeckt werden konnten und nun in dieser Auflage korrigiert worden sind.

Die bis vor einiger Zeit verfügbaren Aufgaben zum Buch wurden aus didaktischen Gründen aus dem Internet heraus genommen. In der Übung zur Vorlesung werden Aufgaben zu den behandelten Themen vorgerechnet, um die Theorie und die praktische Berechnungen gezielt zu erlernen und zu vertiefen.

Danken möchten wir den Hörern des Faches und Lesern des Buches Messtechnik für die Hinweise zu den Fehlern sowie Herrn Dr.-Ing. Jörg Barho und Frau Dipl.-Ing. Lena Webersinke für die nützlichen Kommentare und die Überarbeitung des Manuskripts.

Karlsruhe, im Frühjahr 2008

Uwe Kiencke, Ralf Eger

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Messsysteme und Messfehler</b> .....	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
<b>2. Kurvenanpassung</b> .....	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
<b>3. Stationäres Verhalten von Messsystemen</b> .....	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
<b>4.</b>	<b>Dynamisches Verhalten von Messsystemen . . . . .</b>	<b>85</b>
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
<b>5.</b>	<b>Zufällige Messfehler . . . . .</b>	<b>135</b>
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	$\chi^2$ -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	$\chi^2$ -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
<b>6.</b>	<b>Korrelationsmesstechnik</b>	<b>189</b>
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
<b>7.</b>	<b>Erfassung amplitudenanaloger Signale</b>	<b>243</b>
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
<b>8.</b>	<b>Erfassung frequenzanaloger Signale .....</b>	<b>295</b>
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
	<b>Symbole .....</b>	<b>331</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>335</b>
	<b>Index .....</b>	<b>337</b>