

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Messsysteme und Messfehler</b>	<b>3</b>
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
<b>2</b>	<b>Kurvenanpassung</b>	<b>25</b>
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
<b>3</b>	<b>Stationäres Verhalten von Messsystemen</b>	<b>53</b>
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
<b>4</b>	<b>Zufällige Messfehler</b>	<b>105</b>
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	Mittlung zur Störungsunterdrückung . . . . .	129
4.3	Normalverteilte Zufallsvariable . . . . .	131
4.3.1	Normalverteilung . . . . .	131
4.3.2	Zentraler Grenzwertsatz . . . . .	133
4.3.3	$\chi^2$ -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	$\chi^2$ -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
<b>5</b>	<b>Dynamisches Verhalten von Messsystemen</b>	<b>171</b>
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
<b>6</b>	<b>Messung stochastischer Signale</b>	<b>229</b>
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
<b>7</b>	<b>Erfassung analoger Signale</b> . . . . .	<b>295</b>
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
<b>8</b>	<b>Erfassung frequenzanaloger Signale</b> . . . . .	<b>355</b>
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 Periodendauermessun- gen . . . . .	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
<b>A</b>	<b>Symbole und Tabellen</b>	<b>397</b>
A.1	Symbole . . . . .	397
A.2	Tabellen . . . . .	400
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>401</b>
	<b>Index</b>	<b>405</b>