

# Inhaltsverzeichnis

1	<b>Einführung</b> .....	1
2	<b>Deterministische Signale und Systeme</b> .....	3
2.1	Klassifizierung von Signalen .....	3
2.1.1	Zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Signale .....	3
2.1.2	Wertkontinuierliche, wertdiskrete, analoge und digitale Signale .....	4
2.1.3	Reelle und komplexe Signale .....	4
2.1.4	Gerade und ungerade Signale.....	5
2.1.5	Rechtsseitige und linksseitige Signale.....	5
2.1.6	Periodische und aperiodische Signale .....	5
2.1.7	Energiesignale und Leistungssignale.....	6
2.1.8	Deterministische und stochastische Signale .....	7
2.2	Standardsignale .....	8
2.2.1	Sprungfunktion.....	8
2.2.2	Rechteckimpuls .....	9
2.2.3	Impulsfunktion .....	9
2.2.4	Exponentielle Signale.....	12
2.3	Klassifizierung von Systemen.....	14
2.3.1	Systeme mit und ohne Gedächtnis.....	15
2.3.2	Kausale Systeme .....	15
2.3.3	Lineare Systeme .....	16
2.3.4	Zeitinvariante Systeme .....	17
2.3.5	Lineare zeitinvariante Systeme.....	17
2.3.6	Stabile Systeme .....	17
2.3.7	Aktive, passive, verlustfreie und verlustbehaftete Systeme.....	17
2.4	Beispiele zur Klassifizierung von Signalen und Systemen.....	17
2.4.1	Aufgaben.....	18
2.4.2	Lösungen zu den Aufgaben.....	20
2.5	Lineare zeitinvariante (LTI-) Systeme .....	29
2.5.1	Zeitdiskrete LTI-Systeme.....	29
2.5.1.1	Impulsantwort.....	29
2.5.1.2	Sprungantwort .....	32
2.5.1.3	Kausalität.....	33
2.5.1.4	Stabilität .....	33
2.5.1.5	Eigenfunktion .....	34
2.5.2	Zeitkontinuierliche LTI-Systeme .....	34
2.5.2.1	Impulsantwort.....	34
2.5.2.2	Sprungantwort .....	37
2.5.2.3	Kausalität.....	38
2.5.2.4	Stabilität .....	38
2.5.2.5	Eigenfunktion .....	38

2.5.3	Gegenüberstellung zeitkontinuierlicher und zeitdiskreter LTI-Systeme mit Impulsantwort.....	39
2.5.4	Systeme mit linearen Differentialgleichungen.....	39
2.5.4.1	Einführung.....	41
2.5.4.2	DGL $N$ -ter Ordnung.....	42
2.5.4.3	Signalflussgraphen.....	44
2.5.4.4	Übertragungsfunktion.....	45
2.5.4.5	Ein- und Ausschwingen.....	46
2.5.4.6	Linearität, Zeitinvarianz und Kausalität.....	49
2.5.4.7	Impulsantwort und Übertragungsfunktion.....	50
2.5.5	Systeme mit linearen Differenzgleichungen.....	52
2.5.5.1	DGL $N$ -ter Ordnung.....	52
2.5.5.2	Signalflussgraphen.....	54
2.5.5.3	Übertragungsfunktion.....	56
2.5.5.4	Ein- und Ausschwingen.....	57
2.5.5.5	Impulsantwort, Sprungantwort, Übertragungsfunktion.....	60
2.5.6	Gegenüberstellung zeitkontinuierlicher und zeitdiskreter LTI-Systeme mit Differential- bzw. Differenzgleichungen.....	62
2.6	Beispiele zu LTI-Systemen.....	63
2.6.1	Aufgaben.....	63
2.6.2	Lösungen zu den Aufgaben.....	68
<b>3</b>	<b>Laplace-Transformation und LTI-Systeme.....</b>	<b>88</b>
3.1	Einführung.....	88
3.2	Die Laplace-Transformation.....	89
3.2.1	Definition.....	89
3.2.2	Existenz.....	90
3.2.3	Eigenschaften der Laplace-Transformation.....	91
3.2.4	Laplace-transformierte von Standardsignalen.....	93
3.3	Laplace-Transformation und LTI-Systeme.....	93
3.3.1	Übertragungsfunktion.....	93
3.3.2	BIBO-Stabilität.....	96
3.3.3	Impulsantwort und Sprungantwort.....	97
3.3.4	Eingangs-Ausgangsgleichung.....	97
3.4	Inverse Laplace-Transformation.....	98
3.4.1	Komplexe Umkehrformel.....	98
3.4.2	Inverse Laplace-Transformation rationaler Funktionen.....	98
3.4.3	Rücktransformation durch Partialbruchzerlegung.....	99
3.5	Einseitige Laplace-Transformation u. ihre Anwendung auf R,L,C-Netzwerke.....	100
3.5.1	Differentiationssatz der einseitigen Laplace-Transformation.....	100
3.5.2	Ersatzschaltbild für Laplace-transformierte.....	102
3.6	Beispiele zur Laplace-Transformation und ihrer Anwendung.....	107
3.6.1	Aufgaben.....	107
3.6.2	Lösungen zu den Aufgaben.....	110
<b>4</b>	<b><math>z</math>-Transformation und LTI-Systeme.....</b>	<b>119</b>
4.1	Die $z$ -Transformation.....	119

4.1.1	Definition .....	119
4.1.2	Existenz .....	120
4.1.3	Eigenschaften der z-Transformation .....	122
4.1.4	z-Transformierte von Standardsignalen .....	123
4.2	z-Transformation und LTI-Systeme.....	123
4.2.1	Übertragungsfunktion.....	123
4.2.2	BIBO-Stabilität .....	127
4.2.3	Impulsantwort und Sprungantwort .....	128
4.1.4	Eingangs-Ausgangsgleichung .....	128
4.3	Inverse z-Transformation.....	128
4.3.1	Komplexe Umkehrformel.....	128
4.3.2	Inverse z-Transformation rationaler Funktionen .....	129
4.3.3	Rücktransformation durch Partialbruchzerlegung.....	130
4.3.4	Inverse z-Transformation mit Hilfe der Potenzreihenentwicklung.....	132
4.4	Einseitige z-Transformation und ihre Anwendung.....	133
4.4.1	Verschiebungssatz der einseitigen z-Transformation.....	133
4.4.2	Gegenüberstellung zeitkontinuierlicher u. zeitdiskreter LTI-Systeme im Bildbereich.....	135
4.5	Beispiele zur z-Transformation und ihre Anwendung.....	135
4.5.1	Aufgaben.....	135
4.5.2	Lösungen zu den Aufgaben.....	138
<b>5</b>	<b>Fouriertransformation für zeitkontinuierliche Signale .....</b>	<b>145</b>
5.1	Fourierreihen.....	145
5.1.1	Trigonometrische Form der Fourierreihe.....	146
5.1.2	Harmonische Form der Fourierreihe .....	146
5.1.3	Komplexe Form der Fourierreihe.....	147
5.1.4	Parsevalsche Gleichung .....	149
5.2	Periodische Quellen in R,L,C-Netzwerken.....	151
5.3	Spektrum periodischer Signale und Frequenzgang von LTI-Systemen.....	153
5.4	Fouriertransformation .....	157
5.4.1	Übergang von der Fourierreihe zur Fouriertransformation .....	157
5.4.2	Die Fouriertransformation.....	158
5.4.3	Existenz .....	160
5.4.4	Zusammenhang mit der Laplacetransformation für zeitkontinuierliche Signale .....	160
5.4.5	Eigenschaften der Fouriertransformation .....	161
5.4.6	Fouriertransformierte von Standardsignalen .....	163
5.4.7	Bandbreite.....	165
5.4.8	Zeitdauer-Bandbreite-Produkt.....	166
5.5	Fouriertransformation und LTI-Systeme .....	167
5.5.1	Frequenzgang.....	167
5.5.2	Lineare Verzerrungen und verzerrungsfreie Übertragung.....	169
5.5.3	Lineare Filterung.....	171
5.6	Beispiele zur Fouriertransformation und ihrer Anwendung.....	175
5.6.1	Aufgaben.....	175
5.6.2	Lösungen zu den Aufgaben.....	177

<b>6</b>	<b>Fouriertransformation für zeitdiskrete Signale</b> .....	187
6.1	Fouriertransformation zeitdiskreter Signale .....	187
6.1.1	Einführung.....	187
6.1.2	Definition .....	188
6.1.3	Existenz .....	190
6.1.4	z-Transformation.....	190
6.1.5	Eigenschaften der Fouriertransformation für zeitdiskrete Signale.....	190
6.1.6	Fouriertransformierte von Standardsignalen .....	192
6.1.7	Bandbreite.....	193
6.1.8	Zeitdauer-Bandbreite-Produkt.....	193
6.2	Fouriertransformation und LTI-Systeme .....	193
6.2.1	Frequenzgang.....	193
6.2.2	Lineare Filterung.....	195
6.3	Zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Signale im Frequenzbereich.....	197
6.4	Beispiele zur Fouriertransformation und ihre Anwendung auf zeitdiskrete Signale.....	199
6.4.1	Aufgaben.....	199
6.4.2	Lösungen zu den Aufgaben .....	201
<b>7</b>	<b>Diskrete Fouriertransformation (DFT)</b> .....	208
7.1	Eigenschaften der DFT .....	208
7.2	Zyklische Verschiebung, lineare und zyklische Faltung .....	212
7.3	Schnelle Fouriertransformation (FFT).....	217
7.3.1	Einführung.....	217
7.3.2	Radix-2-FFT-Algorithmus .....	218
<b>8</b>	<b>Digitale Verarbeitung analoger Signale</b> .....	223
8.1	Spektrum abgetasteter Signale .....	224
8.1.1	Abtastung .....	224
8.1.2	Spektrum abgetasteter Signale .....	225
8.1.3	A/D- und D/A-Umsetzung.....	232
8.2	Impulsinvariante Transformation.....	234
8.3	Bilineare Transformation.....	236
8.4	Beispiel: Analoger und zeitdiskreter Butterworth-Tiefpass .....	237
8.4.1	Analoger Butterworth-Tiefpass.....	237
8.4.2	Impulsinvariante Transformation .....	240
8.4.3	Bilineare Transformation .....	241
8.5	Dezimierung und Interpolation .....	243
8.5.1	Dezimierung.....	243
8.5.2	Interpolation.....	246
8.5.3	Digitale Interpolation für die D/A-Umsetzung.....	247
8.6	Beispiele zur digitalen Verarbeitung analoger Signale.....	252
8.6.1	Aufgaben.....	252
8.6.2	Lösungen zu den Aufgaben .....	253

<b>9</b>	<b>Stochastische Signale und LTI-Systeme</b> .....	255
9.1	Stochastische Variablen .....	256
9.1.1	Einführung .....	256
9.1.2	Charakterisierung stochastischer Variablen .....	258
9.1.3	Mehrere stochastische Variablen .....	265
9.1.4	Abbildung stochastischer Variablen .....	270
9.1.4.1	Einführendes Beispiel .....	270
9.1.4.2	Abbildung einer stochastischen Variablen .....	271
9.1.4.3	Abbildungstheorem für zwei stochastische Variablen .....	275
9.2	Stochastische Prozesse .....	280
9.2.1	Einführung .....	280
9.2.2	Stochastischer Prozess .....	281
9.2.3	Kenngrößen reellwertiger, ergodischer stochastischer Prozesse .....	283
9.2.4	Beispiele für Korrelationsfunktionen und Leistungsdichtespektren .....	287
9.2.5	Weißes Rauschen .....	291
9.3	Reaktion von LTI-Systemen auf stochastische Eingangssignale .....	293
9.3.1	Zeitdiskrete stochastische Prozesse und LTI-Systeme .....	293
9.3.2	Zeitkontinuierliche Prozesse und LTI-Systeme .....	298
9.4	Optimales Suchfilter – Matched-Filter-Empfänger .....	298
9.5	Thermisches Rauschen .....	307
9.6	Beispiele zu stochastischen Variablen, Prozessen und LTI-Systemen .....	310
9.6.1	Aufgaben .....	310
9.6.2	Lösungen zu den Aufgaben .....	314
	<b>Anhang</b>	
A.1	Formelzeichen und Abkürzungen .....	324
A.2	Tabellenverzeichnis .....	327
A.2	Literaturverzeichnis .....	328
A.3	Sachwortverzeichnis .....	331