

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Grundbegriffe der Signal- und Systemtheorie</b> .....	3
2.1	Klassifizierung von Signalen .....	3
2.2	Standardsignale .....	10
2.2.1	Exponentielle Signale .....	10
2.2.2	Sprungfunktion und Rechteckimpuls .....	11
2.2.3	Impulsfunktion .....	12
2.3	Klassifizierung von Systemen .....	16
2.3.1	Systembegriff .....	16
2.3.2	Systemeinteilung nach Signalklassen .....	16
2.3.3	Systeme mit und ohne Gedächtnis .....	17
2.3.4	Kausale Systeme .....	17
2.3.5	Lineare und zeitinvariante Systeme .....	18
2.3.6	Stabile Systeme .....	19
2.3.7	Beispiele .....	19
2.3.7.1	Gleitender Mittelwert .....	19
2.3.7.2	Medianfilter .....	21
2.3.7.3	Gleitender Mittelwert und Median in der Bildverarbeitung .....	22
<b>3</b>	<b>Lineare zeitinvariante Systeme</b> .....	25
3.1	Zeitdiskrete LTI-Systeme .....	25
3.1.1	Impulsantwort .....	25
3.1.2	Sprungantwort .....	29
3.1.3	Kausalität .....	29
3.1.4	Stabilität .....	29
3.1.5	Eigenfunktion .....	30
3.1.6	Beispiel: Barker-Code .....	31
3.2	Zeitkontinuierliche LTI-Systeme .....	32
3.2.1	Impulsantwort .....	33
3.2.2	Sprungantwort .....	35
3.2.3	Kausalität .....	36
3.2.4	Stabilität .....	36
3.2.5	Eigenfunktion .....	36
3.2.6	Beispiel: RC-Glied .....	38
3.3	Gegenüberstellung I: zeitkontinuierliche und zeitdiskrete LTI-Systeme .....	39
<b>4</b>	<b>Systeme mit linearen Differenzgleichungen</b> .....	41
4.1	Einführung .....	41
4.2	Signalflussgraph .....	42
4.3	Übertragungsfunktion .....	45
4.4	Eigenschwingungen .....	46

4.5	Ein- und Ausschwingen, Transienten .....	48
4.5.1	Homogene Lösung der DGL 1. Ordnung .....	48
4.5.2	Partikuläre Lösung der DGL 1. Ordnung .....	49
4.5.3	Transiente, stationärer Anteil, Ein- und Ausschwinganteil .....	50
4.6	Linearität, Zeitinvarianz und Kausalität .....	52
4.7	Systemfunktionen für ein rekursives System 1. Ordnung .....	52
4.7.1	Impulsantwort .....	52
4.7.2	Sprungantwort .....	53
4.7.3	Übertragungsfunktion .....	54
4.7.4	Lösungen für rekursive Systeme 1. Ordnung .....	54
4.8	Rekursive Systeme 2. Ordnung .....	55
4.8.1	Lösungen der homogenen DGL 2. Ordnung .....	55
4.8.2	Stabilität .....	56
4.8.3	Lösung der DGL 2. Ordnung für exponentielle Erregungen .....	57
4.8.4	Systemfunktionen für ein rekursives System 2. Ordnung .....	60
4.9	Beispiele zu DGL und Systemen mit DGL .....	63
4.9.1	Widerstandsnetzwerk .....	63
4.9.2	Zinsformel .....	65
4.9.3	System 2. Ordnung .....	67
4.9.4	Zeitdiskretes Analogon zum Schwingkreis .....	68
<b>5</b>	<b>Systeme mit linearen Differenzialgleichungen .....</b>	<b>70</b>
5.1	Einführung .....	70
5.2	Lineare DGL $N$ -ter Ordnung .....	70
5.3	Signalflussgraph .....	74
5.4	Übertragungsfunktion .....	75
5.5	Ein- und Ausschwingen, Transiente .....	76
5.5.1	Homogene Lösung der DGL .....	76
5.5.2	Partikuläre Lösung der DGL .....	77
5.5.3	Lösung der DGL mit Anfangsbedingungen .....	78
5.5.4	Ein- und Ausschwingen .....	78
5.6	Linearität, Zeitinvarianz und Kausalität .....	80
5.7	Impulsantwort und Übertragungsfunktion .....	80
5.8	Beispiele mit RLC-Netzwerken .....	83
5.8.1	System 1. Ordnung .....	83
5.8.2	Reihenschwingkreis .....	84
5.9	Gegenüberstellung II: zeitkontinuierliche und zeitdiskrete LTI-Systeme .....	86
<b>6</b>	<b><math>z</math>-Transformation und LTI-Systeme .....</b>	<b>88</b>
6.1	Einführung .....	88
6.2	Die $z$ -Transformation .....	89
6.2.1	Definition .....	89
6.2.2	Existenz .....	90
6.2.3	Eigenschaften .....	92
6.2.4	$z$ -Transformierte von Standardsignalen .....	93

6.3	Anwendung der $z$ -Transformation bei LTI-Systemen .....	95
6.3.1	Übertragungsfunktion .....	95
6.3.2	BIBO-Stabilität .....	98
6.3.3	Impulsantwort und Sprungantwort .....	98
6.3.4	Eingangs-Ausgangsgleichung im Bildbereich .....	98
6.4	Inverse $z$ -Transformation .....	99
6.4.1	Komplexe Umkehrformel .....	99
6.4.2	Inverse $z$ -Transformation rationaler Funktionen .....	99
6.4.3	Rücktransformation durch Partialbruchzerlegung .....	101
6.4.4	Beispiel: Konvergenzgebiete und inverse $z$ -Transformation .....	104
6.4.5	Inverse $z$ -Transformation mit der Potenzreihenentwicklung .....	105
6.4.6	Beispiel: System 3. Ordnung .....	106
6.5	Einseitige $z$ -Transformation und ihre Anwendung .....	110
<b>7</b>	<b>Laplace-Transformation und LTI-Systeme .....</b>	<b>114</b>
7.1	Einführung .....	114
7.2	Die Laplace-Transformation .....	114
7.2.1	Definition .....	114
7.2.2	Existenz .....	115
7.2.3	Eigenschaften .....	117
7.2.4	Laplace-Transformierte von Standardsignalen .....	118
7.3	Anwendung der Laplace-Transformation bei LTI-Systemen .....	120
7.3.1	Übertragungsfunktion .....	120
7.3.2	BIBO-Stabilität .....	122
7.3.3	Impulsantwort und Sprungantwort .....	123
7.3.4	Eingangs-Ausgangsgleichung im Bildbereich .....	123
7.4	Inverse Laplace-Transformation .....	125
7.4.1	Komplexe Umkehrformel .....	125
7.4.2	Inverse Laplace-Transformation rationaler Funktionen .....	125
7.4.3	Rücktransformation durch Partialbruchzerlegung .....	126
7.4.4	Beispiel: T-Glied .....	128
7.5	Einseitige Laplace-Transformation und ihre Anwendung .....	130
7.5.1	Differenziationssatz der einseitigen Laplace-Transformation .....	130
7.5.2	Ersatzschaltbild für Laplace-Transformierte .....	132
7.6	Gegenüberstellung III: zeitkontinuierliche und zeitdiskrete LTI-Systeme ...	137
<b>8</b>	<b>Fourier-Transformation für zeitkontinuierliche Signale .....</b>	<b>139</b>
8.1	Fourier-Reihen .....	139
8.1.1	Trigonometrische Form .....	140
8.1.2	Harmonische Form .....	140
8.1.3	Komplexe Form .....	141
8.1.4	Parsevalsche Gleichung .....	143
8.2	Periodische Quellen in RLC-Netzwerken .....	144
8.3	Spektrum periodischer Signale und Frequenzgang von LTI-Systemen .....	147

8.4	Die Fourier-Transformation .....	151
8.4.1	Übergang von der Fourier-Reihe zur Fourier-Transformation .....	152
8.4.2	Definition der Fourier-Transformation .....	153
8.4.3	Existenz .....	154
8.4.4	Zusammenhang mit der Laplace-Transformation .....	155
8.4.5	Eigenschaften der Fourier-Transformation .....	156
8.4.6	Fourier-Transformierte von Standardsignalen .....	157
8.4.7	Bandbreite .....	161
8.4.8	Zeitdauer-Bandbreite-Produkt .....	163
8.5	Anwendung der Fourier-Transformation bei zeitkontinuierlichen LTI-Systemen .....	165
8.5.1	Frequenzgang .....	165
8.5.2	Lineare Verzerrungen und verzerrungsfreie Übertragung .....	167
8.5.3	Lineare Filterung .....	169
8.6	Übungsbeispiele zur Fourier-Transformation .....	173
<b>9</b>	<b>Fourier-Transformation für zeitdiskrete Signale .....</b>	<b>186</b>
9.1	Einführung .....	186
9.2	Definition der Fourier-Transformation für zeitdiskrete Signale .....	186
9.3	Eigenschaften der Fourier-Transformation für zeitdiskrete Signale .....	189
9.4	Fourier-Transformierte von Standardsignalen .....	191
9.5	Bandbreite .....	194
9.6	Anwendung der Fourier-Transformation bei zeitdiskreten LTI-Systemen ...	195
9.6.1	Frequenzgang .....	195
9.6.2	Lineare Filterung .....	196
9.7	Vergleich zeitkontinuierlicher und zeitdiskreter LTI-Systeme im Frequenzbereich .....	201
9.8	Übungsbeispiele zur Anwendung der Fourier-Transformation auf zeitdiskrete Signale .....	201
<b>10</b>	<b>Diskrete Fourier-Transformation (DFT) .....</b>	<b>208</b>
10.1	Definition und Eigenschaften der DFT .....	208
10.2	Zyklische Verschiebung, aperiodische und zyklische Faltung .....	214
10.2.1	Zyklische Faltung .....	215
10.2.2	Schnelle Faltung .....	218
10.3	Schnelle Fourier-Transformation (FFT) .....	222
10.3.1	Einführung .....	223
10.3.2	Radix-2-FFT-Algorithmus .....	224
10.3.3	Beispiel: Tiefpassfilterung eines Bildsignals mit der FFT .....	228
10.4	Orthogonale Transformation .....	230
10.5	Diskrete Kosinus-Transformation (DCT) .....	233
10.5.1	Von der DFT zur DCT .....	233
10.5.2	DCT als orthogonale Transformation .....	237
10.5.3	Beispiel: Anwendung der DCT auf ein Bildsignal .....	239

<b>11</b>	<b>Digitale Verarbeitung analoger Signale</b> .....	242
11.1	Einführung .....	242
11.2	Abtastung von Signalen .....	243
11.2.1	Ideale Abtastung .....	243
11.2.2	Abtasttheorem und Spektren abgetasteter Signale .....	245
11.2.3	A/D- und D/A-Umsetzung .....	250
11.3	Zeitdiskrete Simulation analoger Systeme .....	252
11.3.1	Impulsinvariante Transformation .....	252
11.3.2	Bilineare Transformation .....	254
11.3.3	Beispiel: Butterworth-Tiefpass .....	256
11.3.3.1	Analoger Butterworth-Tiefpass .....	256
11.3.3.2	Beispiel: Impulsinvariante Transformation .....	258
11.3.3.3	Beispiel: Bilineare Transformation .....	259
11.4	Anpassung der Abtastrate .....	261
11.4.1	Unterabtastung .....	262
11.4.2	Interpolation .....	264
11.4.3	Beispiel: Interpolation für die D/A-Umsetzung .....	266
11.4	Übungsbeispiele zur digitalen Verarbeitung analoger Signale .....	270
<b>12</b>	<b>Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung</b> .....	274
12.1	Einführung .....	274
12.2	Zufallsexperimente und stochastische Variablen .....	275
12.3	Charakterisierung stochastischer Variablen .....	277
12.4	Mehrere stochastische Variablen .....	285
12.5	Übungsbeispiele zu stochastischen Variablen .....	292
<b>13</b>	<b>Stochastische Signale und LTI-Systeme</b> .....	297
13.1	Stochastische Prozesse .....	297
13.1.1	Einführung .....	297
13.1.2	Definition stochastischer Prozesse .....	298
13.1.3	Kenngrößen reellwertiger und ergodischer stochastischer Prozesse .....	299
13.1.4	Beispiele für Korrelationsfunktionen und Leistungsdichtespektren .....	304
13.1.5	Weißes Rauschen .....	308
13.2	Reaktion von LTI-Systemen auf stochastische Signale .....	310
13.2.1	Zeitdiskrete stochastische Prozesse und LTI-Systeme .....	310
13.2.2	Zeitkontinuierliche stochastische Prozesse und LTI-Systeme .....	316
13.3	Thermisches Rauschen .....	317
13.4	Detektion und Matched-Filter-Empfänger .....	320
13.4.1	Detektion .....	320
13.4.2	Optimales Suchfilter – Matched Filter .....	324
13.4.3	Beispiel: Mehrkanal-Tokographie .....	331
13.4.4	Beispiel: Chirp-Signal .....	333
13.5	Übungsbeispiele zu stochastischen Prozessen .....	339

---

<b>14 Zustandsraumdarstellung</b> .....	354
14.1 Einführung .....	354
14.2 Zustandsgrößen und Zustandsraumdarstellung .....	354
14.2.1 Systeme 2. Ordnung .....	354
14.2.2 Systeme höherer Ordnung .....	357
14.2.3 Allgemeine Struktur .....	359
14.2.4 Übertragungsfunktion und Impulsantwort .....	360
14.3 Charakteristische Gleichung, Diagonalform und Ähnlichkeitstransformation .....	362
14.3.1 Charakteristische Gleichung und Eigenwerte .....	362
14.3.2 Modalmatrix und Diagonalform .....	363
14.3.3 Ähnlichkeitstransformation und Normalform .....	366
14.4 Zusammenfassung .....	372
 <b>Anhang</b>	
A.1 Formelzeichen .....	373
A.2 Abkürzungen .....	376
A.3 Tabellenverzeichnis .....	377
 <b>Literaturverzeichnis</b> .....	
	378
 <b>Sachwortverzeichnis</b> .....	
	382